

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dražen Ilić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Student:
Dražen Ilić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studiranja i navedenu literaturu.

Zahvaljujem profesoru dr.sc. Zoranu Kožuhu na mentorstvu i docentu dr.sc. Ivici Garašiću na pomoći i korisnoj literaturi.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Tanji Tomić koja me je vodila kroz završni rad i svojim znanjem i iskustvom uvelike doprinjela uspješnoj izradi ovog završnog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i
mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DRAŽEN ILIĆ**

Mat. br.: 0035187803

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ALUMINOTERMIJSKO ZAVARIVANJE TRAČNICA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ALUMINOTHERMIC RAIL WELDING**

Opis zadatka:

Proučiti i opisati princip postupka aluminotermijskog zavarivanja. Navesti područja primjene postupka aluminotermijskog zavarivanja. Navesti kakva je uobičajena priprema spoja za aluminotermijsko zavarivanje tračnica. Opisati postupak zavarivanja tračnica.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti analizu geometrije zavara na uzorcima zavarenim aluminotermijskim zavarivanjem te je potrebno ocijeniti kvalitetu izvedenog zavarenog spoja.

Zadatak zadan:

17. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS JEDINICA	VI
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK	VII
1 Uvod	1
2 Pregled zavarivanja	2
2.1 Razvoj zavarivanja u svijetu	2
2.2 Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj	3
2.3 Zastupljenost postupaka zavarivanja u svijetu	3
2.4 Povijest aluminotermijskog zavarivanja	5
3 Tračnice	6
3.1 Povijesni razvoj tračnica	6
3.2 Općenito o tračnicama	6
3.3 Proizvodnja tračnica	8
3.4 Podjela tračnica prema obliku	10
3.4.1 Vignol tračnica	10
3.4.2 Žljebasta tračnica	11
3.4.3 Specijalne tračnice LR55	11
3.5 Čelici za izradu tračnica	12
3.5.1 Perlitni čelici	12
3.5.2 Bainitni čelici	14
3.6 Zavarivanje tračnica	15
3.6.1 Elektrootporno zavarivanje tračnica	17
3.6.2 FCAW (Zavarivanje samozaštinom praškom punjenom žicom)	18
4 Aluminotermijski postupak zavarivanja	20
4.1 Općenito o postupku	20
4.2 Oprema za zavarivanje	23
4.2.1 Tigl (Lonac)	23
4.2.2 Kalup	24

4.2.3	Predgrijavanje.....	25
4.2.4	Ostala oprema.....	25
4.3	Primjena aluminotermijskog zavarivanja.....	26
4.3.1	Zavarivanje tračnica	26
4.3.2	Reparaturno zavarivanje.....	26
4.3.3	Zavarivanje šipki	27
4.3.4	Povezivanje električnih dijelova	27
5	Aluminotermijsko zavarivanje tračnica	29
5.1	Procedura zavarivanja tračnica.....	29
5.1.1	Pripremni radovi.....	29
5.1.2	Radovi tijekom zavarivanja.....	32
5.1.3	Radovi nakon zavarivanja	33
5.2	Prednosti i nedostaci aluminotermijskog zavarivanja.....	33
5.3	Greške kod aluminotermijskog zavarivanja.....	34
5.3.1	Crne rupe	34
5.3.2	Uključci troske	35
5.3.3	Skupljanje zavara	36
5.3.4	Opekline od pijeska	37
5.3.5	Nedovoljno staljivanje.....	37
5.3.6	Pomicanje kalupa	38
5.3.7	Treperenje zavara	39
5.3.8	Pore.....	39
6	Ekperimentalni dio.....	41
6.1	Opis eksperimenta	41
6.2	Priprema makroizbruska	41
6.3	Mjerenje tvrdoće makroizbrusaka.....	44
7	Zaključak.....	50
	Literatura	51

POPIS SLIKA

Slika 1 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [2]	4
Slika 2 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [2]	5
Slika 3 Dijelovi tračnice [4]	7
Slika 4 Uređaji za valjanje tračnica [6]	9
Slika 5 Vignolove tračnice [8].....	10
Slika 6 Žljebasta tračnica [7].....	11
Slika 7 LR55 tračnice [7]	11
Slika 8 Lamelarna struktura perlita [8]	12
Slika 9 Usporedba mehaničkih svojstava i mikrostrukture perlitnog i bainitnog čelika [4]	14
Slika 10 Usporedba žilavosti po Charpiju novih bainitnih i standardnih prelitnih čelika [4]..	15
Slika 11 TTT dijagram za kontinuirano hlađenje [8]	16
Slika 12 Elektrootporno zavarivanje tračnica [9].....	17
Slika 13 Radnje prije FACW zavarivanja [11]	18
Slika 14 Shema aluminotermijske reakcije	20
Slika 15 Princip aluminotermijskog zavarivanja [14].....	22
Slika 16 Tigl za jednokratnu upotrebu [15]	23
Slika 17 Tigl za višekratnu upotrebu [16].....	24
Slika 18 Kalup [16]	25
Slika 19 Predgrijavanje plinskim plamenom [16].....	25
Slika 20 Hidraulički uređaj [15].....	26
Slika 21 Oprema za postavljanje tiglova [15]	26
Slika 22 Reparturno zavarivanje [16].....	27
Slika 23 Aluminotermijski zavarene armaturne šipke za beton [13]	27
Slika 24 Zavarivanje bakrenih vodiča [17]	28
Slika 25 Priprema spoja položaj tračnica prije zavarivanja [16].....	30
Slika 26 Postavljanje kalupa na mjesto spoja.....	30
Slika 27 Prskalica i termitna masa u tiglu [16]	31
Slika 28 Tigl s termitnom smjesom.....	31
Slika 29 Predgrijavanje kalupa i krajeva tračnica prije zavarivanja [16].....	32
Slika 30 Aluminotremijska reakcija u tiglu [16]	32
Slika 31 Izvlačenje rigle i tečenje rastaljenog čelika u kalup [16].....	32
Slika 32 Hidrauličko uklanjanje kalupa i viška materijala [3]	33
Slika 33 Završno brušenje tračnica [3].....	33
Slika 34 Crna rupa [18]	35
Slika 35 Skupljanje zavara [18]	36
Slika 36 Opekline od pijeska na površini glave tračnice [18]	37
Slika 37 Nedovoljno staljivanje u nožici tračnice [18]	38
Slika 38 Nedovoljno taljenje u nožici tračnice uzrokovano pomicanjem kalupa [18].....	38
Slika 39 Treperenje zavara na krajevima nožice tračnice [18]	39
Slika 40 Porožitet u zavaru [18]	39
Slika 41 Tračnica prije rezanja.....	41

Slika 42 Plinsko rezanje tračnice	42
Slika 43 Rezanje uzorka tračnom pilom	42
Slika 44 Brušenje uzorka brusilicom	43
Slika 45 Ručno poliranje uzorka brusnim papirom.....	43
Slika 46 Makroizbrusak zavora	44
Slika 47 Makroizbrusak glave tračnice s lokacijama mjerenja	45
Slika 48 Dijagram maksimalnih izmjerenih tvrdoća makroizbrusaka	49

POPIS TABLICA

Tablica 1 Simboli postupka proizvodnje tračnica [7]	8
Tablica 2 Oznake čelika za vignol tračnice prema EN 13674 [10].....	13
Tablica 3 Oznake čelika za tračnice sa žlijebom prema EN 14811 [10].....	14
Tablica 4 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u prvoj liniji	46
Tablica 5 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u drugoj liniji	47
Tablica 6 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u trećoj liniji	48

POPIS JEDINICA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
C_{ekv}	ekvivalent ugljika	-
s	udaljenost, pomak	m, cm, mm
v	brzina	km/h
σ	naprezanje	N/mm ²
m/l	opterećenje tračnice	kg/m
θ	temperatura	°C
KV	udarni rad loma	J
t	vrijeme	s

POPIS KRATICA

FCAW – zavarivanje praškom punjenom žicom

AT – aluminotermijsko zavarivanje

EPP – elektrolučno zavarivanje pod praškom

TIG - zavarivanje netaljivom elektrodom volframa u zaštiti inertnog plina

MIG – zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina

MAG – zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina

REL – ručno elektrolučno zavarivanje taljivim elektrodama

EO – elektrootporno zavarivanje

UIC – međunarodna organizacija za tračnice

HB – tvrdoća mjerena Brinellovom metodom

ZUT – zona utjecaja topline

HV10 – mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

MZ – metal zavora

OM – osnovni materijal

SAŽETAK

U radu je opisana problematika aluminotermijskog zavarivanja tračnica. U uvodnom, teorijskom dijelu dane su osnovne informacije o povijesti i razvoju zavarivanja i tračnica. U teoretskom dijelu je opisana uloga tračnica, načinu njihove proizvodnje, vrstama koje postoje. Opisana je kratka povijest aluminotermijskog zavarivanja te sam proces, s prednostima i nedostacima. Aluminotermijski postupak zavarivanja je doživio pravi procvat u željezničkom prometu zbog svoje jednostavnosti, prenosive opreme za zavarivanja, ali i zbog niske cijene. Dan je također opis i ostalih postupaka za zavarivanje tračnica, elektrootporno i FCAW (Fluc Cored Arc Welding) zavarivanje. Prikazana je procedura aluminotermijskog zavarivanja te područja primjene. Na kraju uvodnog dijela su opisane greške koje se javljaju kod aluminotermijskog zavarivanja tračnica.

U eksperimentalnom dijelu rada izrezan je uzorak iz aluminotermijski zavarene tračnice. Prikazan je postupak pripreme makroizbruska. Na uzorku je izmjerena tvrdoća Vickersovom metodom.

Ključne riječi: Tračnice, zavarivanje, aluminotermijski postupak zavarivanja, tvrdoća HV10, mikrostruktura.

1 Uvod

Zavarivanje je spajanje ili prevlačenje dva ili više osnovna materijala primjenom topline i/ili pritiska s dodatnim materijalom ili bez njega [1]. Na taj se način dobiva kontinuirani nerastavljivi spoj ujednačenih svojstava. Tijekom procesa zavarivanja zona spoja je dovedena u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se mogu spajati metalni (čelici, aluminij, bakar, nikal i njihove legure) i nemetalni materijali. Zavarivanje je danas najzastupljenija i najprimjenivanija tehnika spajanja metalnih dijelova i konstrukcija. Ovakav način spajanja metalnih dijelova rezultira visokom kvalitetom i učinkovitosti. Spoj dobiven postupkom zavarivanja je nerastavljiv [1].

Spajanje materijala i metala zavarivanjem je tehnologija koja se koristi u svim granama industrije. Danas je poznat veliki broj postupaka zavarivanja u svakodnevnoj primjeni. Poseban slučaj zavarivanja metala je aluminotermijski postupak zavarivanja koji se temelji na egzotermnoj reakciji pri kojoj se oslobađa velika količina topline potrebna za zavarivanje. Aluminotermijski postupak zavarivanja se može nazvati i lijevačko zavarivanje jer se postupak zavarivanja provodi slično kao lijevanje u kalup. Ovdje se kalup postavlja na mjesto spoja i rastaljeni metal dobiven egzotermnom reakcijom popunjava šupljine kalupa. Rastaljeni metal koji popunjava šupljine kalupa ima visoku temperaturu koja omogućuje taljenje osnovnog materijala i staljivanje osnovnog i dodatnog materijala čijim hlađenjem nastaje zavar.

Aluminotermijsko zavarivanje se najviše primjenjuje kod zavarivanja tračnica. Postupak je vrlo jednostavan i brz, ne zahtjeva puno opreme. Razvijeni su i drugi postupci zavarivanja tračnica. Prve tračnice pojavile su se u 17. stoljeću i one su bile izrađene od drveta. Uvidjelo se da se na taj način vrlo lako prevozi teški teret kojeg su onda vukli konji. Već u početku primjene drvenih tračnica pojavili su se prvi problemi, a to je veliki intenzitet trošenja. U početku se je taj problem riješio oblaganjem drvenih tračnica željeznim limovima da bi se kasnije počele izrađivati tračnice od čelika u cijelosti. Današnji oblik tračnica nije se promijenio u odnosu na tračnice koje su se koristile u povijesti. Materijal od kojih se danas izrađuju tračnice je čelik koji se poboljšava s različitim legirnim elementima i postupcima toplinske obrade kako bi se zadovoljili sve veći zahtjevi koji su postavljeni na suvremene tračnice.

2 Pregled zavarivanja

2.1 Razvoj zavarivanja u svijetu

Većina postupaka zavarivanja razvijeno je u prošlom stoljeću. Spajanje metala se razvijalo usporedno s razvojem spoznaja o metalima. Povijest spajanja metala je započela u brončanom i željeznom dobu, na području današnje Europe i Bliskog istoka. Razvilo se kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, oružja, posuda, nakita i građevina. U srednjem vijeku primjenivalo se kovačko zavarivanje, gdje su se dva dijela koja su se spajala zagrijala do bijelog usijanja i posipala prahom ili pijeskom u svrhu čišćenja. Nakon toga su se na mjestu spoja čekićenjem istisnuli rastaljeni oksidi i troska, a između čistih metalnih površina počinju djelovati međuatomarne sile i dolazi do čvrstog spoja. Kovačkim zavarivanjem su se izrađivali mačevi gdje su se na mač od niskougljičnog čelika kovački zavarile oštrice od visokougljičnog čelika (1,0 – 2,1 %C) čime se je poboljšala kvaliteta, trajnost, tvrdoća i čvrstoća mača. Postoji široka paleta oružja koje se koristilo u ratu, a izrađeni su kovačkim zavarivanjem. Razvoj današnjih postupaka zavarivanja počinje 1802. godine kada je Petrov počeo istraživati električni luk za opću namjenu. Daljnji razvoj postupaka dan je slijedećim redom [2]:

- 1856. godine Joule prvi primjenjuje sučeljeno elektrootporno zavarivanje žica
- 1882. godine N. N. Bernardos (Rusija) prvi koristi električni luk između ugljene elektrode i metala kao izvor energije za zavarivanje uz dodavanje žice u metalnu kupku. Kao izvor istosmjernje struje koristio je bateriju galvanskih članaka (akumulatora). Do tada se električni luk između dvije ugljene elektrode koristio za osvjetljenje.
- 1888. godine N. S. Slavjanov (Rusija) je predložio postupak elektrolučnog zavarivanja metalnom elektrodom. Električni luk je uspostavio između metalne elektrode i metalnih predmeta koji su spajani.
- 1894. godine Sottrand zavaruje prvi puta plinskim plamenom $O_2 + H_2$. Kasnije se razvija plinsko zavarivanje s mješavinom kisik - acetilen ($O_2 + C_2H_2$), koje se od 1916. godine uspješno i široko primjenjuje u industriji.
- 1895. godine počinje se koristiti aluminotermijsko zavarivanje za zavarivanje tračnica i za popravljanje odljevaka.

- 1907. godine Oscar Kjelberg (Švedska) prvi patentira i primjenjuje obloženu elektrodu. Obložena se elektroda proizvodila uranjanjem gole žice u otopinu minerala, a od 1936. godine obloga se nanosi ekstrudiranjem. Bazične elektrode su se počele proizvoditi 1940. godine.
- 1925. godine otkriće postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi vodika „arcatom“.
- 1930. godine počela je primjena automatskog zavarivanja pod praškom - EPP u brodogradnji SAD-a.
- 1936. godine počela je primjena zavarivanja u zaštitnoj atmosferi He - TIG postupak.

Prije drugog svjetskog rata, a posebno poslije, počinje razvoj i primjena zavarivanja zaštitnim plinovima TIG (arc - atom s vodikom, te argonarc s argonom ili helijem kao zaštitnim plinom). MIG zavarivanje se počinje primjenjivati 1948. kao Sigma postupak (Shielded Intert Gas Metal Arc), a 1953. u bivšem SSSR se prvi puta primjenjuje MAG postupak s CO₂ zaštitnim aktivnim plinom. Hladno zavarivanje pod pritiskom se primjenjuje od 1948. godine. Iza 1950. godine se razvijaju mnogi novi postupci kao što su: zavarivanje pod troskom (1951.), trenjem (1956.), snopom elektrona (1957.), ultrazvukom (1960), laserom (1960.), plazmom u SAD-u (1961.) i drugi. Prvo zavarivanje i toplinsko rezanje u svemiru izvedeno je 16.10.1969. u sovjetskom svemirskom brodu "Sojuz 6". Zavarivanje se izvodi i pod vodom (primjenjuju se različite tehnike) [2].

2.2 Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj

Značajniji razvoj zavarivanja u Hrvatskoj postignut je uoči drugog svjetskog rata kada je realizirano nekoliko većih objekata u zavarenoj izvedbi. Među njima je i veliki zavareni cestovni most preko rijeke Save. U periodu od 1950. do 1960. godine, brzo se napuštaju zakovane konstrukcije, a pored REL postupka postupno se uvode ostali postupci zavarivanja koji se i danas koriste (poluautomatski i automatski postupci) [2].

2.3 Zastupljenost postupaka zavarivanja u svijetu

Danas je u svijetu razvijen veliki broj postupaka i varijanti zavarivanja. Glavni razlozi za to su prednosti postupka zavarivanja (mogućnost izrade lakše konstrukcije, u odnosu na lijevane ili zakivane), pojava novih izvora energije (elektronski mlaz i laser) koji su omogućili spajanje materijala koji se do sada nisu mogli zavarivati. Iako je razvijen velik broj postupaka zavarivanja, danas se u najvećoj mjeri koriste sljedeći postupci: REL (ručno elektrolučno

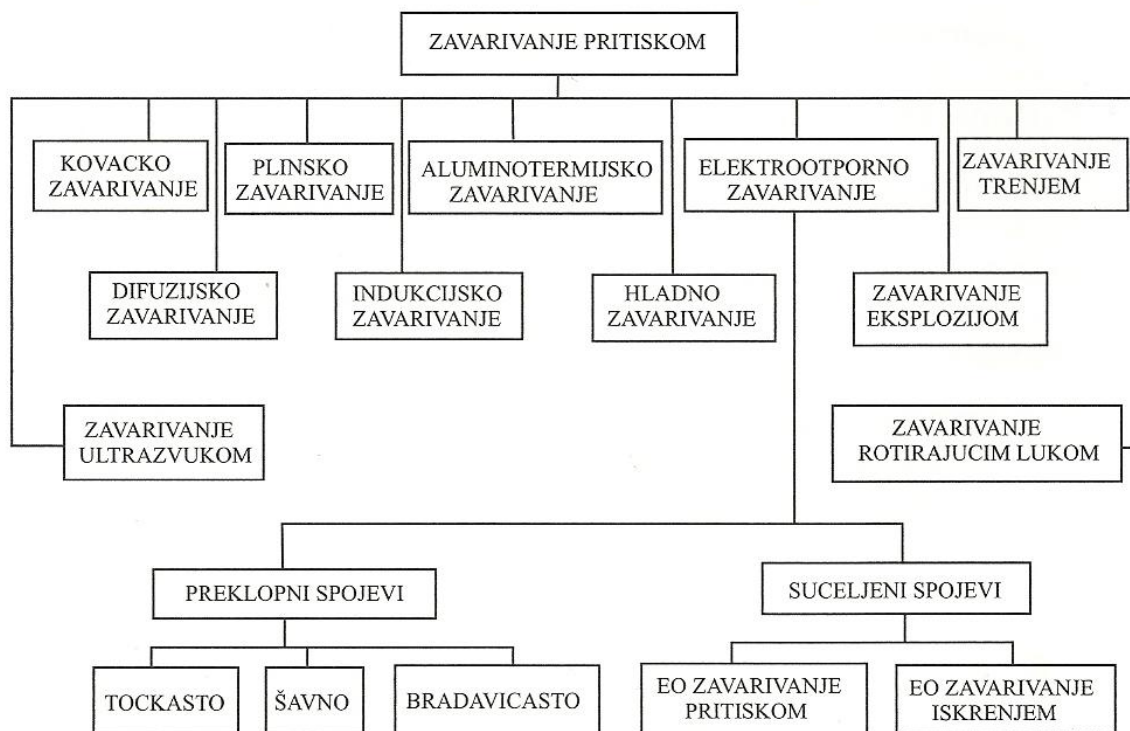
zavarivanje taljivim elektrodama), MIG/MAG (zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova ili mješavina plinova), TIG (zavarivanje netaljivom elektrodom volframa u zaštitnoj atmosferi argona ili helija), EPP (zavarivanje pod praškom) i EO (elektrootporno zavarivanje). Ostali postupci zavarivanja se koriste u manjoj mjeri i za specifične uvjete zavarivanja (materijal, položaj zavarivanja...). Gore navedeni postupci se i dalje razvijaju kako bi pridonjeli da zavar bude kvalitetniji, jeftiniji, brže napravljen, sigurniji, pouzdaniji. Da bi se postigle navedene zahtjevi za zavareni spoj, potrebno je [2]:

- Primjeniti modernu opremu za zavarivanje (invertori, impulsne struje zavarivanja, naprave, mehanizacija, automatizacija i robotizacija zavarivanja, ...);
- Osigurati visoku ponovljivost zavarivanja;
- Koristiti suvremene metode i opremu za kontrolu metodama sa i bez razaranja;
- Primjeniti suvremene materijale za gradnju lakših, trajnijih, ekonomičnijih i pouzdanijih zavarenih konstrukcija.

Postoje dvije osnovne grupe zavarivanja metala: zavarivanje taljenjem prikazano na slici 1 i zavarivanje pritiskom prikazani slikom 2 [3].



Slika 1 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [3]



Slika 2 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [3]

2.4 Povijest aluminotermijskog zavarivanja

Počeci aluminotermijskog zavarivanja povezuju se s eksperimentima ruskog znanstvenika Nikolaya Beketova na Sveučilištu u Harkivu (Ukrajina) koji je dokazao da aluminij izdvaja metal iz njegovog oksida. Reakcija je prvo korištena za redukciju metalnih oksida bez ugljika. Reakcija je vrlo egzotermna, ali je potrebna visoka energija za prekidanje jakih veza između atoma u krutinama. Oksid se je zagrijavao u retorti u peći. 1837. godine Theodore Goldschmidt je osnovao Goldschmidt kompaniju koja je opskrbljivala tekstilnu industriju kemikalijama te je pokrenuto istraživanje i razvoj procesa za preradu metala i njegovih oksida. 1893. godine Hans Goldschmidt je unaprijedio aluminotermijsku reakciju paljenjem smjese finog metalnog oksida i aluminijeveg praha bez grijanja smjese izvana. To je rezultiralo da u ožujku 1895. godine Hans Goldschmidt razvije aluminotermijsku reakciju na ostale metale, čime počinje nagli razvoj aluminotermijskog procesa. Prvo se postupak koristio za popravke velikih dijelova od lijevanog i kovanog čelika, a kasnije je razvijeno zavarivanje pritiskom koristeći produkte reakcije i spojene su prve tračnice [4].

3 Tračnice

3.1 Povijesni razvoj tračnica

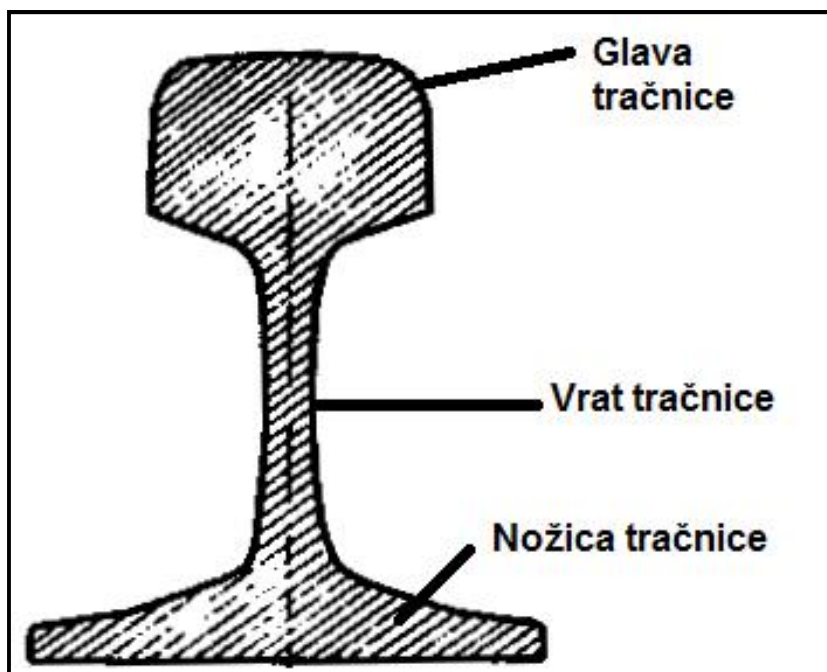
Prve metalne tračnice korištene u Engleskoj u rudnicima i za tramvaje u 18. stoljeću su bile izrađene od lijevanog željeza. Takav materijal je bio krhak i nije mogao apsorbirati opterećenja kao plastičnu deformaciju, pa su lomovi tračnica bili česti. Tako je pri javnoj demonstraciji prvog parnog stroja, 1808. godine u Londonu, došlo do loma tračnice, a time i loma lokomotive, čime je neslavno završena prezentacija novog tehnološkog čuda. Intenzivno trošenje je također bio problem, pa je u cilju njegovog smanjenja, brzina vožnje na prvoj njemačkoj pruzi smanjena sa početnih 40 km/h na 24 km/h. Problem trošenja se uvijek provlačio kroz stalne zahtjeve za povećanjem kvalitete i čvrstoću čelika. Slijedeći korak u razvoju tračnica su bile uzdužne drvene grede obavijene željeznim trakama koje su korištene kao jeftina alternativa željeznim prugama početkom 19. stoljeća, npr. u Njemačkoj i u Sjevernoj Americi. Željezne trake debljine oko 25 mm su se savijale pod utjecajem kontaktnih napona. Ovaj kompozit se može usvojiti kao prva primjena otvrdnjavanja glava, koja je sada u upotrebi. Čelik je ušao u praktičnu upotrebu sredinom 19. stoljeća. Točnije, prvi čelik koji je korišten za tračnice je upotrebljen u Engleskoj 1857. godine. Mikrostruktura ovih tračnica je u suštini jednaka današnjim tračnicama - perlitna struktura ugljično-manganskog sastava. Karakteristike čelika za tračnice, posebno njegova čvrstoća i žilavost, su mnogo bolje od lijevanog željeza i njegov razvoj je omogućio širenje mreže željeznica širom svijeta. Prvi britanski standard za čelike za tračnice napisan je 1903. godine, i zahtijevao je minimalnu vlačnu čvrstoću od 618 N/mm^2 . Interesantno je primjetiti da su četiri od prvih jedanaest britanskih standarda bili vezani za željeznicu, što samo govori o važnosti ovog segmenta za industrijski razvoj zemlje. Sadašnji zahtjevi za čvrstoću su 710 N/mm^2 za normalnu klasu i 880 N/mm^2 za klasu otpornu na trošenje [5].

3.2 Općenito o tračnicama

Tračnica je osnovni konstruktivni dio prisilno vođenih vozila. Ona preuzima sile nošenja i vođenja vozila i prenosi ih na podlogu. Ta se opterećenja prenose na gornji ustroj preko vrlo male dodirne površine (kotača i tračnice), pa je stoga potrebno osigurati da spajanje tračnica bude kvalitetno. Tračnice su kontinuirani nosači, budući da leže na mnogo oslonaca, tj. na drvenim, betonskim ili čeličnim pragovima. Zadatak ugrađenih tračnica u kolosijeku je [6] :

- Osiguravanje kotrljanja kotača po površini,
- Prihvaćanje sila kočenja i pokretanja vozila,
- Vođenje kotača u bočnom pravcu,
- Provođenje električne struje na električnim prugama,
- Primanje normalne sile uslijed temperaturnih promjena,
- Prenašanje primljenog opterećenja preko podložnih ploča, pragova i zastora ravnomjerno na zemljani trup pruge,
- Pouzdano i sigurno vođenje kotača vozila.

Glavni dijelovi tračnice: glava tračnice, vrat tračnice i nožica tračnice su prikazani slikom 3 [6].



Slika 3 Dijelovi tračnice [6]

Glava tračnice je dio koji zbog neposrednog dodira s kotačima vozila prima njegovo opterećenje i koji se tijekom vremena troši, te je i ojačana (više nego je potrebno) [6].

Vrat tračnice je okomiti dio i zaobljen je prema glavi i nožici kako bi se omogućilo postavljanje vezica i njihova priljubljenost uz vrat. Visina i širina vrata su bitne za prijenos opterećenja. Uobičajeno je da širina vrata iznosi jednu desetinu od visine tračnice [6].

Nožica tračnice je važna zbog prijenosa opterećenja na prag i na stabilnost tračnice. Zbog toga je i proširena, te prilagođena s gornje strane za oslanjanje vezica i za pričvršćivanje pričvrstnim pločicama (pričvršćenjem za rebrastu ploču osigurava tračnicu od prevrtanja), a s donje strane za oslanjanje na prag (pločicu) [6].

Tip tračnice određen je njenom masom u kilogramima po duljinskom metru. Prema UIC (International Union of Railways) normama, tipovi tračnice se dijele na lake i teške. Lakim tipovima se smatraju tipovi tračnica do 50 kg/m, a teškim preko 50 kg/m. U Hrvatskoj se danas ugrađuju uglavnom tračnice tipa UIC-60 mase 60 kg/m, koje mogu podnijeti opterećenje po osovini od 350 kN i maksimalne brzine 300 km/h, i tračnice tipa S-49 s opterećenjem do 225 kN i najvećom brzinom do 160 km/h [6].

Kod tračnica težeg profila (> 50 kg/m) dolazi do [6]:

- manjeg zamora materijala,
- veće sigurnosti prometa,
- manjih deformacija pružnog tijela,
- smanjenih troškova održavanja.

3.3 Proizvodnja tračnica

Postupak proizvodnje tračnica je složen i zahtjevan proces. Sve vrste tračnica se proizvode iz željezne rude iz rudnika koja se transportira u željezare i njenih visokih peći, gdje se zagrijava do tekućeg stanja uz dodatak staroga željeza koji oplemenjuje proizvedeni čelik. Kod samoga taljenja u visokim pećima, dolazi do oslobađanja štetnih primjesa (fosfor, sumpor) i vrši se dodavanje silicija, mangana i sl. za oplemenjivanje čelične mase. Tračnice se izrađuju valjanjem, a pri posljednjem prolasku kroz valjke, tračnica dobiva oznaku s nazivom proizvođača, godinom proizvodnje, podrijetlom čelika, kvalitetom materijala, smjeru valjanja. Prema UIC – ovom kodeksu od 01.01.1979. godine za izradu tračnica koriste se čelici dobiveni slijedećim postupkom:

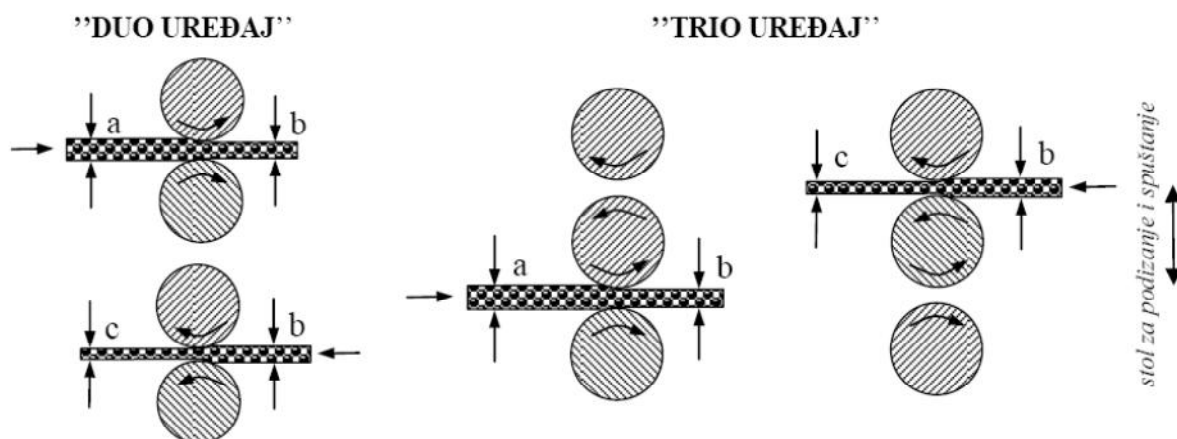
Tablica 1 Simboli postupka proizvodnje tračnica [7]

POSTUPAK PROIZVODNJE ČELIKA	SIMBOL ZA POSTUPAK PROIZVODNJE
Thomasov postupak	T
Siemens - Martinov postupak	
Elektro postupak	
Postupak propuhivanja kisikom	

Pri proizvodnji tračnica, potrebno je razlikovati slijedeće pojmove:

- "ŠARŽA" - zagrijana čelična masa dobivena jednim od gore navedenih postupaka,
- "KOKILE" - posebni konični kalupi u koje se izlijeva zagrijana čelična masa,
- "INGOT" - djelomično ohlađena masa koja se vadi iz kalupa (3 do 3,5t),
- "BLOOM" – dobiva se postupkom kontinuiranog lijevanja.

Veličina kokile određuje se prema budućoj namjeni ingota odnosno bloom-a, tj. ovisi o tome koji će se tip tračnice valjati. Npr. kokila za ingote iz kojih će se izvaljati tračnica S 49 ima dimenzije 65×65 cm u tlocrtu, visine 220 cm i gornjeg presjeka oko 60×60 cm. Čelik se lijeva u kokile uglavnom na dva načina, lijevanjem odozgo i lijevanjem odozdo. Kod prvog načina lijevanja prisutne su nečistoće po čitavom presjeku i koristi se kad se ide odmah na valjanje. Kod drugog načina lijevanja, nečistoća se zadrži samo na gornjem dijelu ingota. "Ingoti" odnosno "bloomovi" vade se iz kalupa i otpremaju u posebne peći gdje se izjednačava temperatura cijeloga bloka na optimalnu temperaturu valjanja (≈ 1150 do 1250 °C) nakon čega slijedi postupak valjanja. Višekratnim prolazom užarenog čelika između dva ili tri valjka, dobiva se konačni oblik tračnice. Uređaji za valjanje tračnica prikazani su slikom 4 [7].



Slika 4 Uređaji za valjanje tračnica [7]

Površina proizvedenih tračnica mora biti čista, bez kapljica, površinskih šupljina, pregorjelih, prevaljanih i uvaljanih mjesta i bez grešaka koje mogu utjecati na mehanička svojstva i ispravno ponašanje tračnice u kolosijeku. Manje površinske greške dozvoljene su ukoliko se ne nalaze na površini glave ili na krajevima na površinama u dužini nalijeganja vezice. U eksploataciji tračnice su izložene trošenju u pravcu (okomito na glavu tračnice) i u luku (bočno na voznu površinu). Kako bi se smanjilo trošenje ugrađuje se podmazivanje tračnica [6].

Specifično trošenje tračnica jesu valovitost i naboranost. Interesantna je naboranost koja se uglavnom javlja na unutarnjoj tračnici u lukovima malenog polumjera. Naboranost i valovitost uklanjaju se brušenjem vozne površine specijalnim brusnim vlakovima.

Na veličinu trošenja tračnice utječu [6]:

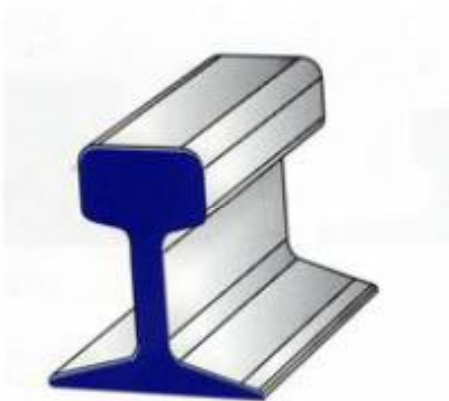
- tvrdoća tračnice,
- odnos vlačne čvrstoće čelika kotača i tračnica,
- veličina proširenja kolosijeka u luku,
- veličina kuta naleta,
- razmak osovina,
- brzina vožnje,
- uzdužna razina pruge,
- intenzitet prometnog opterećenja pruge.

3.4 Podjela tračnica prema obliku

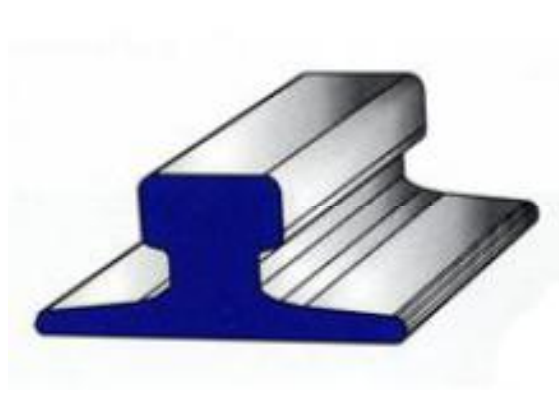
Najčešće korišteni profili tračnice se mogu podijeliti prema obliku na Vignolovu, žljebastu i specijalne tračnice.

3.4.1 Vignol tračnica

Vignol tračnica je najčešće korištena tračnica na željezničkim prugama, prikazana slikom 5 a). Na slici 5 b) je prikazana posebna varijanta Vignolove tračnice, tkz. kranasta tračnica. Ona kontinuirano leži na podlozi i služi za vođenje dizalica na gradilištima i u lukama [8, 9].



a) standardna Vignolova tračnica



b) kranasta tračnica

Slika 5 Vignolove tračnice [8]

3.4.2 Žljebasta tračnica

Ovaj oblik tračnice prikazan slikom 6 ima glavu u obliku žlijeba, najčešće se koristi za vođenje tramvaja (na mjestima gdje su cestovni i tramvajski promet u istoj razini). Sastoji se od glave, žlijeba, vrata i nožice tračnice [8].



Slika 6 Žljebasta tračnica [8]

3.4.3 Specijalne tračnice LR55

Ovaj oblik tračnice prikazan je slikom 7. Karakteristika tih vrsta tračnica je da se nalaze u betonskom kanalu. Prostor između betona i kanala ispunjen je poliuretanskom masom koja omogućuje elastičnost tračnice, smanjuje buku i pojavu lutajućih struja. Koristi se za izradu tramvajskih pruga [8].



Slika 7 LR55 tračnice [8]

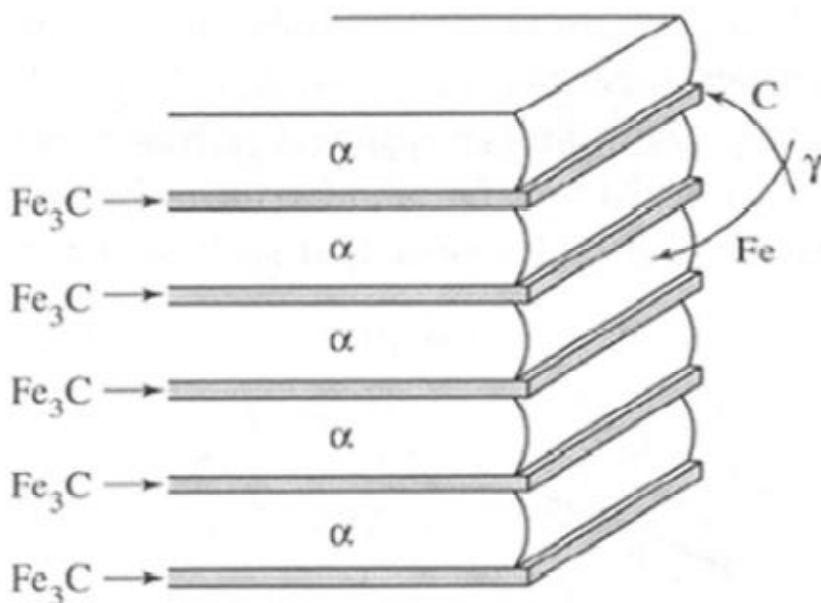
3.5 Čelici za izradu tračnica

Moderni željeznički sustavi su izloženi intenzivnom prometu, velikim brzinama i opterećenjima, pa je važno da materijal od koga su izrađene tračnice odgovara postavljenim zahtjevima. Najvažniji zahtjev koji se postavlja pred materijal je nepromjenjivost strukture, koja se u eksploataciji narušava mehanizmima umora materijala, nedostatkom otpornosti krhkom lomu i pretjeranom trošenju.

Budući da čelik ima veliki modul elastičnosti, visoku čvrstoću, žilavost i otpornost na trošenje, relativno nisku cijenu, gotovo svi kotači i tračnice su napravljene od čelika. Zato je razvoj materijala za tračnice uglavnom išao prema poboljšanju svojstava čelika, a nije se pojavio gotovo nijedan materijal koji bi zamjenio čelik. Materijali od kojih se danas proizvode tračnice su perlitni čelici i u novije vrijeme bainitni čelici [5].

3.5.1 Perlitni čelici

Standardni čelici za tračnice su perlitne mikrostrukture i sadrže oko 0,7 % C. Perlit ima lamelarnu strukturu sastavljenu od mekog ferita (α) i relativno tvrdog i krhkog cementita (Fe_3C). Lamelle ferita su oko sedam puta deblje od lamela (listića) cementita. Perlit posjeduje dobru otpornost na trošenje zbog tvrdog cementita koji je u kombinaciji sa žilavijim feritom. Prosječna vrijednost tvrdoće mjerene Brinellovom metodom prirodno hlađenih standardnih tračnica je oko 300 HB. Lamelarna mikrostruktura perlita prikazana je slikom 8 [5, 10].



Slika 8 Lamelarna struktura perlita [10]

Zbog sve većih zahtjeva u pogledu brzine i opterećenja tračnica, posljednjih nekoliko godina se nastoji povećati čvrstoća pa tako danas postoje premium tračnice čija je vlačna čvrstoća od 1300 do 1400 N/mm². To se postiže smanjenjem razmaka između lamela i kontrolom brzine rasta perlita. Dodatkom legirajućih elemenata kao što su krom i nikal, mogu se poboljšati mehanička svojstva čelika. Tračnice se mogu i termički obraditi, što također pridonosi poboljšanju svojstava. Mehanička svojstva se mogu poboljšati povećanjem brzine hlađenja čime se dobije fina perlitna struktura povećane tvrdoće. Maksimalne tvrdoće koje se mogu postići kod takvih perlitnih čelika su 350 – 390 HB [5].

Čelici za tračnice podijeljeni su u određene klase prema europskim normama EN 13674 za vignol tračnice i EN 14811 za tračnice sa žlijebom. U tablicama 2 i 3 može se vidjeti kemijski sastav različitih vrsta čelika. Oznaka čelika prema navedenim normama na primjeru R370CrHT pokazuje [10]:

R – otpornost na trošenje,

370 – tvrdoća na kontaktnoj površini tračnice i vozila po Brinellu,

Cr – legiran sa kromom,

HT – toplinski obrađeno.

Tablica 2 Oznake čelika za vignol tračnice prema EN 13674 [10]

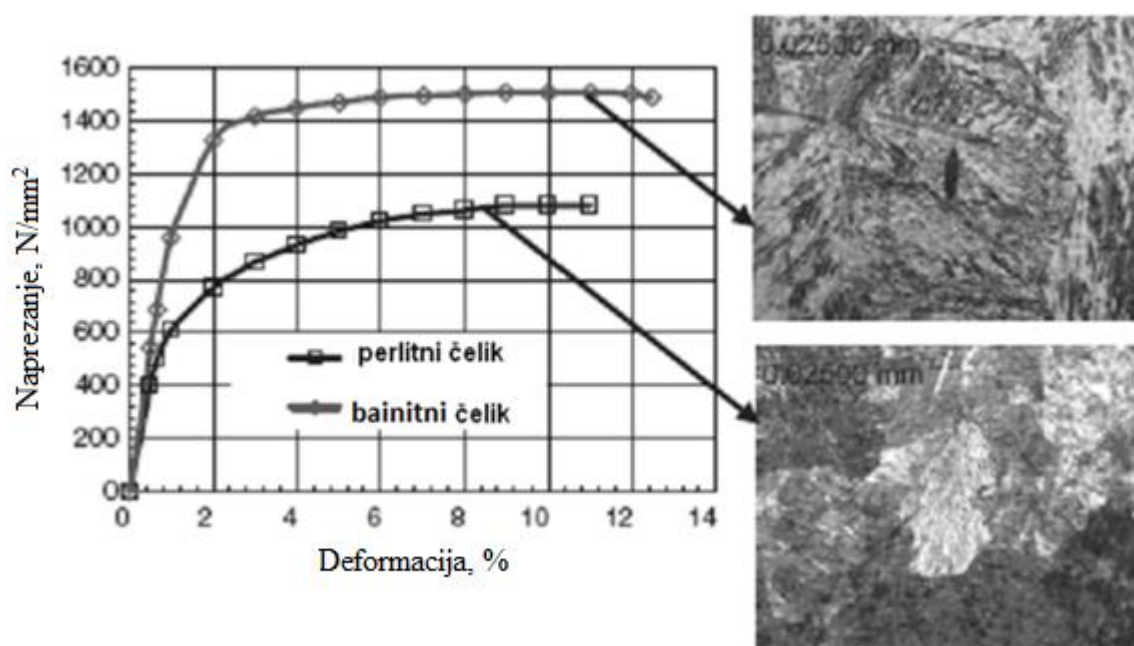
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	min. tvrdoća
R200	0,40–0,60	0,15–0,58	0,70–1,20		200 HB
R220	0,50–0,60	0,20–0,60	1,00–1,25	max. 0,15	220 HB
R260	0,62–0,80	0,15–0,58	0,70–1,20	max. 0,15	260 HB
R260Mn	0,55–0,75	0,15–0,60	1,30–1,70	max. 0,15	260 HB
R320Cr	0,60–0,80	0,50–1,10	0,80–1,20	0,80–1,20	320 HB
R350HT	0,72–0,80	0,15–0,58	0,70–1,20	max. 0,15	350 HB
R350LHT	0,72–0,80	0,15–0,58	0,70–1,20	max. 0,30	350 HB
R370CrHT	0,70–0,82	0,40–1,00	0,70–1,10	0,40–0,60	370 HB
R400HT	0,90–1,00	0,20–0,40	1,20–1,30	0,20–0,30	400 HB

Tablica 3 Oznake čelika za tračnice sa žlijebom prema EN 14811 [10]

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	tvrdća [HB]
R200G	0,40-0,60	0,15-0,58	0,70-1,20	200-240
R220G	0,50-0,65	0,15-0,58	1,00-1,25	220-260
R260G	0,62-0,80	0,15-0,58	0,70-1,20	260-300
R260GHT	0,40-0,60	0,15-0,58	0,70-1,20	260-300
R290GHT	0,50-0,65	0,15-0,58	1,00-1,25	290-330
R340GHT	0,62-0,80	0,15-0,58	0,70-1,20	340-390

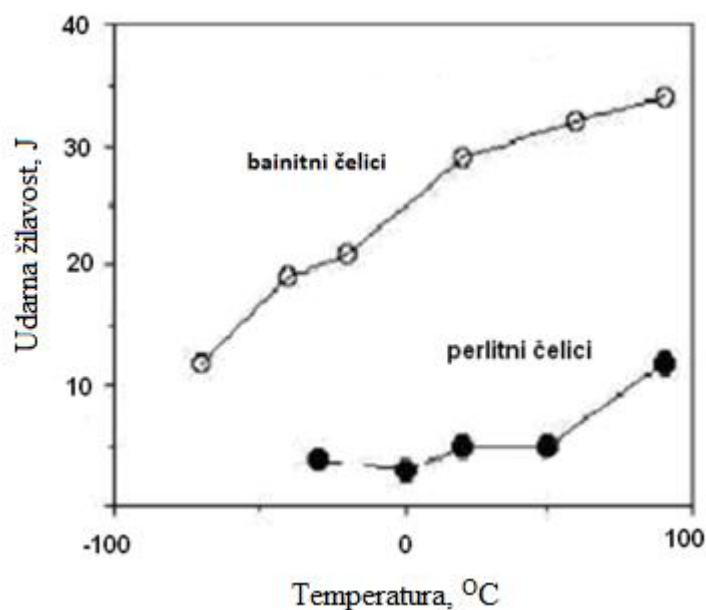
3.5.2 Bainitni čelici

Čelici s bainitnom mikrostrukturom postižu tvrdoću do 450 HB. Ova mikrostruktura je u prošlosti malo korištena zbog visokog udjela ugljika i loše otpornosti na trošenje. Ovakvi čelici koriste se zbog izuzetne tvrdoće, čvrstoće i otpornosti na trošenje, a to se postiže mikrostrukturom kod koje cementit više nije u obliku lamela, nego u obliku sitnih kuglastih čestica koje se izlučuju na granicama ferita i dodatkom odgovarajućih legiranih elemenata (Mo, B, Cr). Bainitni čelici se lako liju i imaju dobru zavarljivost. Na slici 9 je prikazana usporedba mehaničkih svojstava i mikrostrukture perlitnog i bainitnog čelika za tračnice [5, 10].



Slika 9 Usporedba mehaničkih svojstava i mikrostrukture perlitnog i bainitnog čelika [5]

Razvijena je još jedna vrsta bainitnih čelika. To su bainitni čelici bez karbida obogaćeni silicijem. Ti se čelici legiraju s 1,5 %Si koji ima nisku rastvorljivost u cementitu i sprječavaju njegov rast. Ovakvi čelici pokazuju dobra svojstva žilavosti i smanjenu brzinu trošenja, uz jednako dobru tvrdoću. Omogućena je primjena na niskim temperaturama i veća dozvoljena veličina greške. Slikom 10 prikazana je žilavost po Charpy-ju u ovisnosti s temperaturom standardnih perlitnih čelika i novih bainitnih čelika [5].



Slika 10 Usporedba žilavosti po Charpyju novih bainitnih i standardnih perlitnih čelika [5]

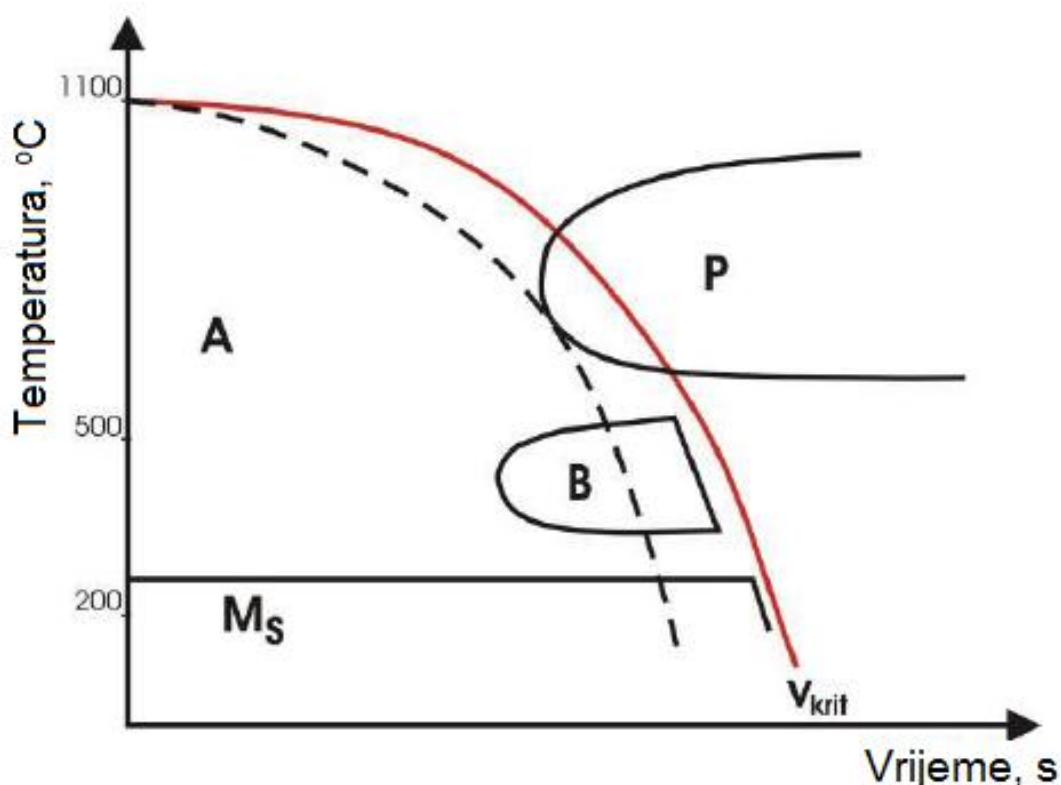
3.6 Zavarivanje tračnica

Kada se govori o zavarljivosti tračnica, jedan od glavnih kriterija koji se uzima kao relevantan je ekvivalent ugljika (C_{ekv}). Ekvivalent ugljika dobija se po slijedećoj formuli:

$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

Što je veća vrijednost C_{ekv} , zavarljivost čelika je lošija. Zavarljivost čelika za tračnice ovisi o kemijskom sastavu čelika, a ne ovisi o tvrdoći. Tvrdoća utječe na izbor dodatnog materijala koji se koristi tijekom procesa zavarivanja. Iskustveno se preporuča da se čelici koji imaju ekvivalent ugljika veći od 0,4 prije zavarivanja predgriju. Općenito se može reći, što je veća količina legiranih elemenata u čeliku, veća je mogućnost pojave krhke martenzitne mikrostrukture, što se može dogoditi i nakon zavarivanja. Mjesto gdje prijeti najveća opasnost od krhke mikrostrukture je u zoni utjecaja topline (ZUT). Kontroliranjem brzine hlađenja prilikom proizvodnje tračnica, a isto tako i uvođenjem predgrijavanja kod zavarivanja

tračnica, može se dobiti odgovarajuća perlitna mikrostruktura. Slika 11 prikazuje kakvim intenzitetom moramo hladiti tračnice da bi dobili perlitnu mikrostrukturu. [10]



A-austenit; P-perlit; B-bainit; M_s -martenzit; v_{krit} -kritična brzina hlađenja

Slika 11 TTT dijagram za kontinuirano hlađenje [10]

Potreba zavarivanja tračnica se javlja iz slijedećih razloga. U radionicama je moguće spojiti tračnice na osnovnu duljinu (18 m; 22,5 m itd.) koje se onda nastoje na gradilištu zavariti u trak što veće duljine. U kolosijeku se vrši zavarivanje tračnica u odsjeke dugih trakova ili se vrši završno zavarivanje. Prilikom oštećenja ili puknuća tračnice, moguće je odrezati dio tračnice koji je oštećen i zamijeniti ga novim dijelom tračnice koji se onda zavaruje. Veliki problemi javljaju se prilikom prijelaza između dva tračnička profila. Prijelaz stvara velike poteškoće u kolosijeku te je zato potrebno tračnice u kolosijeku na prijelazu između dva različita profila zavariti [6].

Najvažniji postupci zavarivanja tračnica su:

- *Elektrootporno zavarivanje (ET postupak),*
- *Aluminotermitsko zavarivanje (AT postupak),*
- *FACW (Zavarivanje samozaštinom praškom punjenom žicom),*

- Električno zavarivanje – elektrodama,
- Plinsko zavarivanje.

3.6.1 Elektrootporno zavarivanje tračnica

Elektrootporno zavarivanje je danas najbrži, najjeftiniji i najkvalitetniji postupak zavarivanja tračnica. Primjenjuje se u radionicama i valjaonicama za popravke tračnica jer zahtjeva masivnu i tešku opremu za izvođenje zavora. U jednoj smjeni je moguće izvesti oko 100 kvalitetnih zavora jednim strojem. Prije početka zavarivanja potrebno je krajeve tračnica dobro očistiti od nečistoća, masnoća i hrđe kako bi se dobio što kvalitetniji zavar. Kod elektrootpornog zavarivanja se krajevi tračnica čvrsto stegnu u stroju za zavarivanje. Elektrode za dovod struje su međusobno udaljene 12 – 16 cm. Zavarivanje se provodi izmjeničnim stezanjem i otpuštanjem krajeva tračnica kroz koje se propušta električna struja jakosti 25000 A i napona 6-15 V. Pri prijelazu struje između krajeva tračnica nastaje varnica i razvija se toplina. Stroj naizmjenično pomiče tračnice jednu ka drugoj i odmiče ih, pri čemu sagorijevaju čelični djelići i krajevi tračnica se dovode na temperaturi taljenja. Sada se pristupa sabijanju tračnica pod pritiskom te dolazi do njihovog skrućivanja i stvaranja srha na mjestu zavora. On se čisti sjekačem u još toplom stanju najčešće strojno nakon čega slijedi brušenje zavora, tako da se profili tračnica savršeno poklapaju. Vrijeme izvršenja jednog zavora iznosi oko 3 minute. Postupak elektrootpornog zavarivanja prikazan je slikom 12 [10, 11].



Slika 12 Elektrootporno zavarivanje tračnica [11]

3.6.1.1 Prednosti i mane

Zavarivanje elektrootpornim načinom daje jedan od najkvalitetnijih zavora, te se primjenjuje gdje god je to moguće. Zbog kvalitete nije potrebno voditi brigu o položaju zavora u kolosijeku u odnosu na oslonce (pragove). Na mjestu elektrootpornog zavora ne postoje nikakva zadebljanja, te ne predstavlja smetnje pri manipulaciji tračnicom. Prilikom popravaka tračnica u radionicama aluminotermijski zavar se mora rezati, dok se elektrootporni ne mora, te ima znatno manje otpada. Nedostatak je što se izvodi u radionicama, pa su tračnice ograničene dužine (oko 200 m, bolje je što duže) [6].

3.6.2 FCAW (Zavarivanje samozaštinom praškom punjenom žicom)

Zavarivanje samozaštićujućom praškom punjenom žicom naziva se još i innershield postupak zavarivanja. Innershield metoda izvodi se konstantnim kontaktom elektrode po mjestu zavora tračnica. Pritiskom na okidač, započinje izlaženje žice. Dodirom žice i metala nastaje struja kratkog spoja koja zagrijava i tali dodatni materijal, žicu. Nakon što se žica i metal rastale, započinje njihovo miješanje. Talina u isto vrijeme počinje topiti prašak u jezgri žice čime nastaje zaštitni plin koji štiti zavar od utjecaja okoline. Električni luk i područje zavora su tako zaštićeni plinovima i troskom nastalom gorenjem i topljenjem praška zatvorenog u jezgri žice [12]. Prije samog zavarivanja potrebno je kao i kod ostalih postupaka za spajanje tračnica obaviti čišćenje dodirnih ploha, pozicionirati glave tračnica i njihove strane, te predgrijati krajeve tračnica na određenu temperaturu. Prilikom zavarivanja potrebno je koristiti set bakrenih podložaka koji se sastoji od oslonca ispod tračnica i dva bočna samostojeća oslonca različitih oblika koji slijede bočnu konturu tračnica (Slika 13) [12].



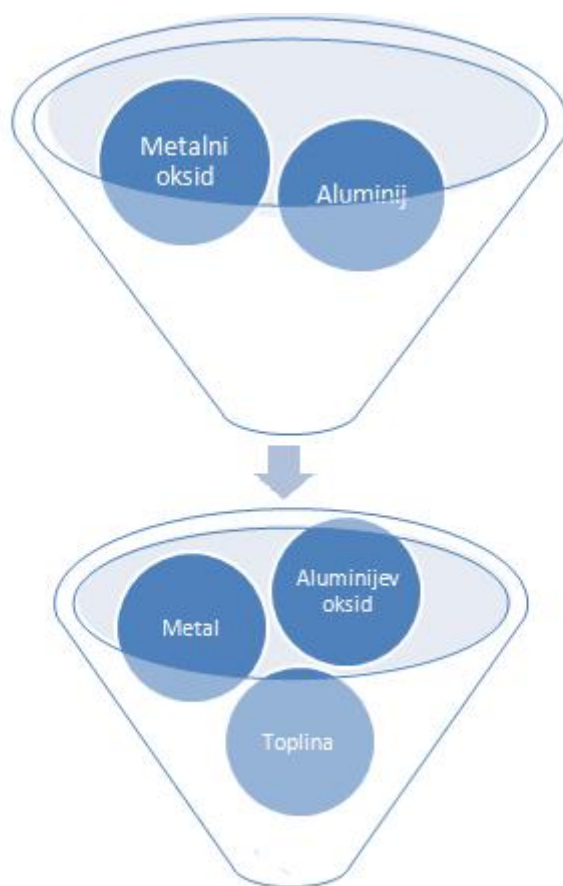
Slika 13 Radnje prije FACW zavarivanja [13]

Nakon što su odrađeni postupci pripreme, postavlja se podložni oslonac ispod nožice, te se nožica zavaruje u dva sloja. Nakon zavarivanja nožice postavljaju se bočni oslonci i tada započinje zavarivanje vrata tračnice. Zavarivanje vrata tračnice izvodi se prema gore i mora se izvesti u više prolaza. Prije zavarivanja glave tračnice uklanja se nastala troska, a zatim slijedi zavarivanje glave. Nakon svakog prolaska zavora glave uklanja se nastala troska pneumatskim čekićem. Poslije zavarivanja potrebno je omogućiti sporo hlađenje zavarenog spoja kako ne bi došlo do pojave neželjene mikrostrukture [13].

4 Aluminotermijski postupak zavarivanja

4.1 Općenito o postupku

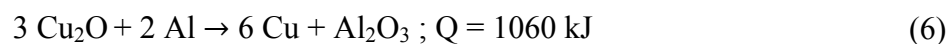
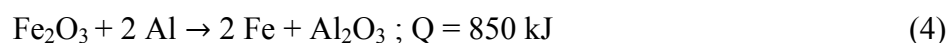
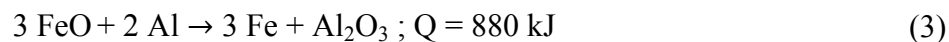
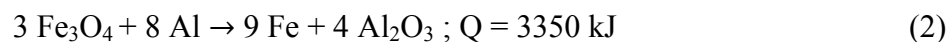
Aluminotermijsko zavarivanje je postupak gdje se spajanje metala ostvaruje pomoću pregrijane taline koja nastaje kemijskom reakcijom između metalnog oksida i aluminija, sa ili bez primjene pritiska. Dodatni materijal se osigurava iz rastaljenog metala. Osnova aluminotermijskog postupka zavarivanja je redukcija metalnog oksida u metal. Kao redukcijsko sredstvo koristi se aluminij, koji zbog velikog afiniteta prema kisiku prelazi u aluminijev oksid. Reakcija se odvija prema slici 14 [14]:



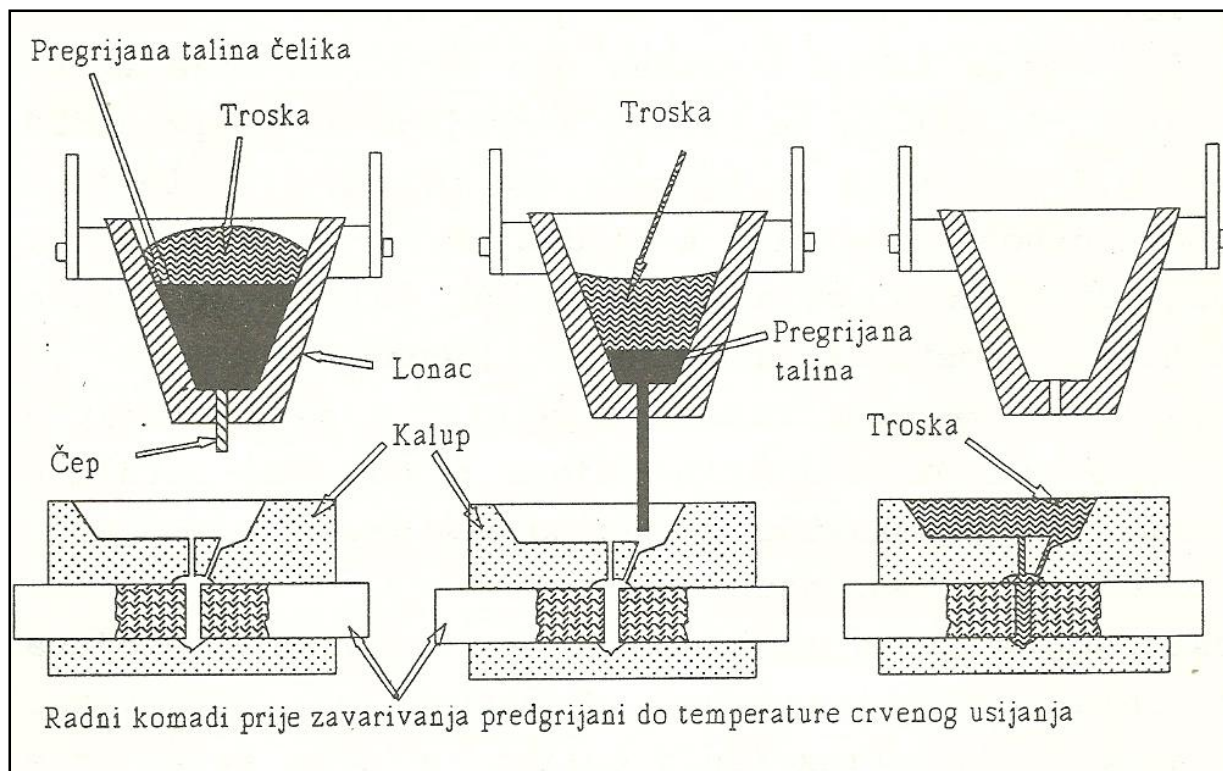
Slika 14 Shema aluminotermijske reakcije

Reakcija može krenuti i završiti samo ako je afinitet prema kisiku reducirajućeg elementa (aluminija) veći od afiniteta prema kisiku metalnog oksida. Toplina dobivena egzotermnom reakcijom stvara tekući proizvod koji se sastoji od metala i aluminijevog oksida. Ako je gustoća troske niža od gustoće metala, kao u slučaju čelika i aluminijevog oksida, dolazi do trenutnog odvajanja. Troska aluminijevog oksida pluta na površini taline i štiti rastaljeni čelik od okolne atmosfere, a rastaljeni čelik se nalazi u loncu koji ima zatvarač tkz. „rigla“. Kada

je rastaljeni čelik u potpunosti zagrijan, „rigla“ se makne, a talina počinje teći kroz šupljinu između dijelova koji se zavaruju, a koji su zatvoreni kalupom. Navedene su tipične egzotermne reakcije i dobivena toplina [14]:



U gore navedenim reakcijama, aluminij je reducirajući faktor. Teorijski, elementi poput magnezija, silicija i kalcija bi se također mogli koristiti u istu svrhu. Međutim, kalcij i magnezij se ne koriste zbog problema dobivanja tih metala, a silicij se uglavnom koristi kod toplinske obrade, vrlo rijetko kod zavarivanja. Reakcija (2) je najčešće korištena reakcija kod aluminotermijskog zavarivanja. Omjeri takvih smjesa su najčešće tri masena udjela željeznog oksida i jedan maseni udio aluminija. Teoretska temperatura dobivena ovom reakcijom je oko 3100 °C. Gubici energije preko posude i zračenjem, smanjuju teoretsku temperaturu na oko 2480 °C. To je maksimalna temperatura zato što aluminij isparava na oko 2500 °C. Međutim, maksimalna temperatura nebi trebala biti puno niža budući da se aluminijev oksid (Al_2O_3) na 2040 °C skrućuje. Gubici energije također ovise o količini termitne mase koja reagira. Što je veća količina termitne mase, manji su gubici energije. Legirni elementi se mogu dodati u termitnu mješavinu kako bi došlo do legiranja zavara prilikom zavarivanja. Ostali dodaci koji se mogu dodati u termitnu mješavinu se koriste kako bi povećali tečenje i snizili temperaturu skrućivanja aluminijevog oksida. Princip aluminotermijskog zavarivanja prikazan je slikom 15.



Slika 15 Princip aluminotermijskog zavarivanja [1]

Termitna reakcija nije eksplozivna i zahtjeva manje od jedne minute kako bi završila, a to ovisi o količini. Da bi reakcija krenula, potrebna je posebna šipka (nalik na prskalicu) za paljenje ili poseban prašak kako bi se mogla zapaliti termitna smjesa. Prašak ili šipka za paljenje će zapaliti termitnu masu kada se postigne temperatura zapaljenja praška ili šipke koja iznosi oko 1200 °C. Dijelovi koji se zavaruju, moraju biti odgovarajuće poravnani. Površine koje se spajaju, trebaju biti očišćene od hrđe, prljavštine, masti i vlage. Mora biti osiguran pravilan razmak između površina koje se spajaju, a veličina razmaka ovisi o širini spoja. Širi spojevi zahtijevaju veći razmak. Kalup se stavlja oko spoja koji se zavaruje. On se mora sagraditi oko dijelova koje treba spojiti. Kako bi se izveo dobar spoj, spojne površine se moraju dovoljno zagrijati kako bi došlo do stapanja između rastaljene termitne mase i osnovnog materijala. Iako se postupak naziva zavarivanje, postupak više sliči lijevanju metala. Prilikom aluminotermijskog zavarivanja u odnosu na lijevanje, treba uzeti u obzir slijedeće činjenice: tijekom očvršćivanja dolazi do skupljanja materijala, potrebno je eliminirati tipične greške koje se pojavljuju kod lijevanja, osigurati pravilno tečenje rastaljenog čelika, izbjegavati komešanja prilikom ulijevanja metala u spoj [14].

Vrlo bitan faktor kod aluminotermijskog zavarivanja je proces hlađenja. Ako bi se hlađenje provodilo brzo, dobila bi se veća tvrdoća čelika, ali bi njegova mikrostruktura bila

krupnozrnata. Takav materijal slabo je otporan na udarce, tj. žilavost takvih čelika je vrlo mala. Kako bi se postigla potrebna mehanička svojstva i zadovoljavajuća tvrdoća, potrebno je proces hlađenja voditi sporije. Mehanička svojstva i tvrdoća zavara mora biti barem jednaka svojstvima i tvrdoći osnovnog materijala, a poželjno je da budu veći.

4.2 Oprema za zavarivanje

Oprema za aluminotermijsko zavarivanje je vrlo jednostavna i može se izraditi u većini poduzeća. Najvažnija oprema koja se koristi kod aluminotermijskog zavarivanja su tiglovi, kalupi, predgrijači te ostala popratna oprema koja služi za postavljanje tiglova i kalupa.

4.2.1 Tigl (Lonac)

Tigl je komponenta u kojoj se odvija aluminotermijska reakcija, taljenje termitne mase i odvajanje troske od dodatnog materijala. On mora biti otporan na visoke temperature. Postoje dva tipa tiglova, za jednokratnu upotrebu, prikazan slikom 16, i višekratnu upotrebu, prikazan slikom 17. Prednosti tigla za jednokratnu upotrebu je manja masa opreme, nije potrebno predgrijavanje tigla i smanjuju se greške uključaka troske koje se pojavljuju kod tigla koji se upotrebljava više puta. Tiglovi za jednokratnu upotrebu su napravljeni od tankog lima otpornog na sve vremenske uvjete i oštećenja. Oni imaju ručku za lakše rukovanje. Velika prednost takvih tiglova je jednostavno odlaganje nakon zavarivanja. Slika prikazuje tigl za jednokratnu upotrebu [15].



Slika 16 Tigl za jednokratnu upotrebu [15]

Tiglovi za višekratnu upotrebu sastoje se od željeznog plašta koji se oblaže vatrootpornom masom. Vatrootporna masa je smjesa 85 % magnezitnog praha i 15 % vatrootporne gline. Na dnu lonca se nalazi rigla s otvorom, kroz koji se ispušta rastaljeni čelik. Otvor se zatvara riglom koja se postavlja odozdo. Ispuštanje čelika iz lonca se vrši povlačenjem rigle šipkom za izvlačenje. Tigl se postavlja na postolje iznad otvora kalupa tako da otvor tigla sjedne na otvor kalupa.



Slika 17 Tigl za višekratnu upotrebu [16]

4.2.2 Kalup

Kalupi služe za dovodenje rastaljenog materijala na mjesto zavarivanja i formiranje zavora. Kalupi također predstavljaju izolacijski materijal koji smanjuje gubitke topline i olakšava predgrijavanje dijelova do potrebne temperature. Kalupi se izrađuju u elementima i sastoje se od dva do tri dijela. Kalupi se najčešće izrađuju od kramike. Prije zavarivanja, kalupi se suše na temperaturi od 120 °C do 150 °C u vremenu od 6 do 8 sati. Prilikom postavljanja kalupa na mjesto spoja koristi se glina kako bi kalup zatvorio mjesto spoja i zabrtvio ga. Za učvršćivanje kalupa primjenjuju se različiti pritiskači, stezači i drugi najjednostavniji mehanizmi. Slikom 18 je prikazan postupak nanošenja gline na kalup.



Slika 18 Kalup [16]

4.2.3 Predgrijavanje

Krajeve dijelova koji se zavaruju potrebno je prije zavarivanje predgrijati na temperature od 500 °C do 900 °C. Predgrijavanje se najčešće izvodi plinskim plamenom kako je prikazano slikom 19.



Slika 19 Predgrijavanje plinskim plamenom [16]

4.2.4 Ostala oprema

Ostalu opremu čine specijalne držači čija je svrha držanje dijelova kojima se zavaruje, hidraulički uređaj za vruće uklanjanje srha i kalupa te brusilice za finu obradu glave tračnice i rubnih dijelova.



Slika 20 Hidraulički uređaj [15]



Slika 21 Oprema za postavljanje tiglova [15]

4.3 Primjena aluminotermijskog zavarivanja

4.3.1 Zavarivanje tračnica

Najčešća primjena postupka je kod zavarivanja tračnica u dugi trak. To je učinkovit način spajanja tračnica čime se smanjuje broj vijčanih spojeva. U rudnicima ugljena, tračnice su zavarene zato jer se tako smanjuju troškovi održavanja i reducira pretjerano prosipanje ugljena uzrokovanog neravnim tračnicama. Tračnice kрана su također zavarene s ciljem smanjena troškova održavanja spoja i smanjenja vibracija na okolne zgrade koje proizvode kotači kada prelaze preko spoja izvedenog nekim drugim načinom spajanja [14].

4.3.2 Reparturno zavarivanje

Osim zavarivanja tračnica, aluminotermijski postupak se koristi za reparturno zavarivanje. Reparturno zavarivanje se koristi u brodogradnji za popravak teških sekcija od čelika kao što su slomljen okvir krme broda, dijelovi kormila, osovine i amortizacijski dijelovi. Slomljeni zubi zupčanika i letvi te zubi valjkastih dijelova se mogu zamijeniti novim dijelovima, ljevati ili kovati na veće dimenzije nakon čega slijedi obrada odvajanjem. Takvi dijelovi se onda aluminotermijski zavare na glavnu sekciju. Jako istrošeni krajevi čeličnih valjaka mlina se

također mogu popraviti nanošenjem dovoljne količine tvrde termitne metalne mase, nakon čega slijedi strojna obrada. Ovakav način popravka se najčešće koristi tamo gdje je potrebna velika količina nataljenog materijala, gdje toplina taljenja dijelova ne može postići na odgovarajući ili učinkovit način ili gdje su lom ili šupljina toliko veliki da zahtjevaju veliku količinu nataljenog materijala. Aluminotermijsko zavarivanje se može koristiti za popravak ingota kalupa čime se značajno povećavaju uštede u odnosu na zamjenu novim kalupom. Dno kalupa može biti u potpunosti odrezano i obnovljeno rastaljenim metalom dobivenim aluminotermijskom reakcijom. Za to je potrebna velika količina rastaljenog metala. Lopatice velikih rovokopača mogu se zavariti aluminotermijski na središnji prsten. U tom slučaju to je više proizvodnja alata nego popravak [14].



Slika 22 Reparaturno zavarivanje [17]

4.3.3 Zavarivanje šipki

Ojačane šipke za beton mogu se zavarivati aluminotermijski bez predgrijavanja. Tako povezane šipke omogućuju da su dimenzije betonskih stupova i greda manje nego što bi to bio slučaj da nisu međusobno zavarene. Zavarene armaturne šipke su prikazane slikom 23 [14].



Slika 23 Aluminotermijski zavarene armaturne šipke za beton [14]

4.3.4 Povezivanje električnih dijelova

Smjesta termita koji se sastoji od bakrovog oksida i aluminija koristi se za spajanje bakrenih vodiča postupkom aluminotermijskog zavarivanja. Reakcijom između reaktanata dobiju se produkti (rastaljeni bakar i troska aluminijevog oksida) visoke temperature u vremenu od 1 do

5 sekundi. U termitnu smjesu se mogu dodati različiti legirni elementi koji poboljšavaju svojstva zavara. Proces se primarno koristi za zavarivanje bakrenih šipki, kablova i žica jednako dobro kao i zavarivanje bakrenih vodiča za uzemljenje na tračnicama. Na slici 24 je prikazan aluminotermijski zavar bakrenih vodiča. Kalup od grafita se postavlja na mjesto spoja na tračnici. Nakon što završi reakcija, rastaljeni bakar se ulijeva u kalupnu šupljinu. Nakon toga kreće taljenje osnovnog materijala i bakrenog vodiča, a zatim slijedi skrućivanje osnovnog materijala i bakrenog vodiča. Zatim se uklanja kalup. Kalup se može više puta koristiti [14].



Slika 24 Zavarivanje bakrenih vodiča [18]

5 Aluminotermijsko zavarivanje tračnica

5.1 Procedura zavarivanja tračnica

Postupak aluminotermijskog (AT) zavarivanja primjenjiv je za zavarivanje svih tračničkih profila, za tračnice normalne kvalitete. Pri povezivanju tračnica u dugi trak (DT) primjenjuju se dva osnovna načina zavarivanja:

- elektrootporno (EO zavarivanje) – u pogonu, radionici;
- aluminotermitsko – na pruzi.

Kod aluminotermijskog zavarivanja mogu se koristiti dva postupka: sporozavarni postupak (vrijeme predgrijavanja je oko 30 minuta) te brzozavarni postupak (vrijeme predgrijavanja traje 5 do 8 minuta). Danas se u pravilu primjenjuje brzozavarni postupak koji se može podijeliti prema obliku zavora te prema načinu predgrijavanja. Prema obliku zavora razlikujemo: zavar bez ojačanja, zavar s ojačanjem te zavar s plosnatim ojačanjem (kod nas u primjeni). Prema načinu predgrijavanja razlikuje se: zavarivanje bez predgrijavanja, zavarivanje s kratkim predgrijavanjem te zavarivanje s predgrijavanjem (kod nas u primjeni). Radovi kod izvođenja aluminotermijskog zavarivanja su: pripremni radovi, radovi pri zavarivanju te radovi poslije zavarivanja [9].

Aluminotermijsko zavarivanje je produktivan i visoko mobilan način spajanja masivnih čeličnih konstrukcija kao što su tračnice. Unos visoke količine topline i metalurška svojstva čine postupak idealnim za zavarivanje modernih tračnica od čelika visoke čvrstoće i tvrdoće. Proces aluminotermijskog zavarivanja ne smije biti izvođen od nekoga tko nema certifikat i rutinu u obavljanju posla. Radovi kod aluminotermijskog zavarivanja se mogu podijeliti na pripremne radove, radove tijekom zavarivanja i završne radove [9].

5.1.1 Pripremni radovi

Prvi korak prilikom zavarivanja tračnica je rezanje tračnice i poravnavanje. Ukoliko se izrađuje potpuno nova pruga, tračnice su već odrezane u pogonu. Tračnice se mogu rezati s pilom ili plinski u struji čistog kisika. Ako se radi rekonstrukcija zavora na već postavljenim tračnicama, potrebno je označiti na glavi tračnice gdje će se izvesti rezanje. Nakon rezanja je potrebno ukloniti šljaku, hrđu i očistiti rubove od rezanja. Rezanje se mora izvesti tako da rez bude okomit na uzdužnu os tračnice kako bi se mogao dobiti ujednačen dilatacijski razmak između dijelova tračnice koje se spajaju. Razmak između dvije tračnice koje se zavaruju mora biti pažljivo određen na temelju tipa tračnice i postupka zavarivanja. Razmak se kreće u

rasponu od 20 do 30 mm. Nakon što se izvrši priprema tračnica rezanjem, slijedi postavljanje tračnica na pragove (ne radi se u slučaju rekonstrukcije). Kako bi se dobio pravilan zavar potrebno je izvesti poravnavanje krajeva tračnica. Krajevi tračnice se podese po voznom rubu i voznoj površini, ali pazeći da se osi poklapaju tako da nema vitoperenja krajeva tračnice. Prije poravnavanja potrebno je provjeriti ravnoću tračnice i ukloniti potencijalne greške ravnosti koje bi kasnije uzrokovale loš zavar. Slika 25 prikazuje pravilan položaj tračnica prije zavarivanja [9].



Slika 25 Priprema spoja i položaj tračnica prije zavarivanja [16]

Nakon poravnavanja tračnica, sastavlja se kalup za lijevanje koji se postavlja oko mjesta zvara. Ako se radi o sporozavarnom postupku, onda se kalup izrađuje na licu mjesta. Ukoliko se radi o brzozavarnom postupku, kalup se izrađuje od silikatnog pijeska u specijalnim radionicama i nakon toga doprema na gradilište. Nakon pričvršćenja kalupa, glinom se popune zračnosti između kalupa i profila tračnice kako nebi došlo do istjecanja taline, prema slici 26.



Slika 26 Postavljanje kalupa na mjesto spoja

Na tračnice se pričvršćuje ostala oprema koja se koristi kod zavarivanja. To su razne šipke, stezači, nosači tigla. Na nosač tigla se postavi tigl s termitnom masom u koju se stavi „prskalica“ koja služi za paljenje termitne mase, kako je prikazano slikom 27.



Slika 27 Prskalica i termitna masa u tiglu [16]

Tigl se predgrijava na temperaturu oko 100 °C kako bi se kemijska reakcija pravilno odvijala. Termitna masa proizvedena je tako da je kompatibilna sa osnovnim materijalom. Slikom 28 je prikazan tigl s termitnom masom.



Slika 28 Tigl s termitnom smjesom

Prije početka zavarivanja potrebno je izvršiti predgrijavanje kalupa i krajeva tračnica. To se najčešće izvodi s plinskim plamenom, prema slici 29. Temperatura predgrijavanja ovisi o tipu

tračnice, materijalu, vrsti tigla, vrsti plina, tlaku plina.



Slika 29 Predgrijavanje kalupa i krajeva tračnica prije zavarivanja [16]

5.1.2 Radovi tijekom zavarivanja

Nakon završetka predgrijavanja, lonac s termitnom masom se postavlja iznad kalupa, zapali se termitna masa i kreće egzotermna reakcija. Na dnu spremnika nalazi se rigla koja se povuče posebnom šipkom i počinje tečenje rastaljenog čelika temperature oko $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ u šupljine kalupa. Rastaljeni čelik u dodiru s osnovnim materijalom (tračnicama) počinje taliti osnovni materijal te na taj način započinje proces zavarivanja. Nakon toga dolazi do sjedinjenja čelika od dodatnog i osnovnog materijala, te počinje proces skrućivanja.



Slika 30 Aluminotremijska reakcija u tiglu [16]



Slika 31 Izvlačenje rigle i tečenje rastaljenog čelika u kalup [16]

5.1.3 Radovi nakon zavarivanja

Zavar se ostavi da se ohladi određeno vrijeme (3 – 5 min) i zatim se višak čelika i kalup uklanjaju s mjesta zavora pomoću hidrauličnog uređaja za vruće uklanjanje prikazan slikom 32.



Slika 32 Hidrauličko uklanjanje kalupa i viška materijala [4]

Nakon što se zavar u potpunosti ohladi, obrađuje se brusilicom po voznoj površini i rubovima uz kontrolu zavora ravnalom. Slikom 33 je prikazana brusilica za brušenje tračnica.



Slika 33 Završno brušenje tračnica [4]

5.2 Prednosti i nedostaci aluminotermijskog zavarivanja

Aluminotermijski postupak zavarivanja je vrlo jednostavan postupak zavarivanja jer zahtjeva relativno malo opreme i to lagane. Vrijeme potrebno za zavarivanje je vrlo kratko (može trajati oko 20 min). Ako se u obzir uzme i vrijeme potrebno za hlađenje zavora, ukupno

vrijeme prije nego što se može normalno odvijati promet je oko 70 minuta. Najveći nedostatak aluminotermijskog zavora je što se on izvodi lijevanjem, dok se tračnica proizvodi valjanjem. Iako je moguće postići potpuno jednaka mehanička svojstva aluminotermijskog zavora i tračnica, ponašanje zavora i osnovnog materijala u eksploataciji nije jednako. Zavar je takvog oblika da ne može doći na bilo koje mjesto u kolosijeku. Propisano je da on mora biti barem 50 mm udaljen od ruba podložne pločice. Potrebno je voditi brigu o položaju zavora i rasporedu pragova u okolini zavora. Zadebljanja na vratu i nožici tračnice kasnije otežavaju njezine popravke. Tada se ti dijelovi izrezuju zbog čega nastaje određeni gubitak materijala u tračnicama [9].

5.3 Greške kod aluminotermijskog zavarivanja

Greške kod aluminotermijskog izvedenog zavora se pojavljuju svakodnevno. Iako se postupak aluminotermijskog zavarivanja koristi već više od 100 godina, još uvijek se događaju greške u zavarenom spoju. Veća brzina i opterećenje karakteristike su koje se postavljaju na današnje tračnice, a samim time isti ti zahtjevi se postavljaju na zavar. Kako bi se postigao kvalitetan zavar potrebno je posvetiti pažnju na svaki detalj prilikom zavarivanja. Područja na koje treba obratiti posebnu pažnju su:

- Priprema krajeva tračnica prije zavarivanja,
- Postavljanje i poravnavanje kalupa na mjesto spoja,
- Oblaganje,
- Postavljanje aparature za predgrijavanje,
- Predgrijavanje,
- Čišćenje i predgrijavanje lonca za zavarivanje.

Najčešće greške koje se javljaju kod aluminotermijskog zavarivanja su: crne rupe, uključci troske, skupljanje zavora, opekotina od pijeska, nedovoljno taljenje, pomak kalupa, treperenja zavora, porozitet [19].

5.3.1 Crne rupe

Crna rupa je izolirana plinska pora u gornjem dijelu zavora tračnice. Ime je dobila po karakterističnom izgledu koji je prikazan slikom 34. Crne rupe su bile glavni razlog odbacivanja zavora. Postoji vrlo malo zabilježenih slučajeva otkazivanja zavora zbog crnih rupa. Oštećenje je uzrokovano prolaskom plina kroz zavar prilikom skrućivanja. Izvor plina je

para izolacijskog materijala koji se nalazi ispod nožice tračnice. Ukoliko se koriste tračnice koje su uže od normalnih širina, mogućnost pojave crnih rupa se povećava [19].



Slika 34 Crna rupa [19]

Kako bi se smanjila pojava crnih rupa, potrebno je [19]:

- Koristiti razmak između glava tračnice veći od 24 mm, podešavajući razmak između zavora ako je potrebno,
- Osigurati da obloga kalupa nije previše vlažana,
- Nadzirati sve provjere i procedure za kontrolu poroziteta,
- Provesti predgrijavanja ispravno.

5.3.2 Uključci troske

Uključci troske su uzrokovani:

- Neodgovarajućim čišćenjem ili nije primjenjeno čišćenje lonca u slučaju kada se koriste višenamjenski lonci,
- Loše izrežanim dijelovima s pogrešnim parametrima rezanja koji uzrokuju žlijebove ili neadekvatno uklanjanje troske i oksida može uzrokovati uključke troske na zavaru,
- Neodgovarajućim predgrijavanjem se može inicirati formiranje uključaka troske koji su zarobljeni u zavaru,
- Pogrešno odabranim razmakom između dijelova koji se zavaruju može se utjecati

na tečenje materijala u kalup i mogu se pojaviti uključci troske,

- Hladnim lijevanjem ili preranim lijevanjem dijelova može uzrokovati nastajanje uključaka troske [19].

5.3.3 Skupljanje zavora

Skupljanje zavora se najčešće pojavljuje u nožici tračnice zavora. Događa se u završnoj fazi skrućivanja zavora. Greška skupljanja zavora prikazana je slikom 35.



Slika 35 Skupljanje zavora [19]

Uzroci nastanka ove greške su [19]:

- Nedovoljno predgrijavanje prije zavarivanja,
- Nekorištenje tenzora ili loše postavljanje čeljusti,
- Ostali radovi na pruzi koji uzrokuju naprezanja na zavaru koji se hladi,
- Promjene temperature može uzrokovati naprezanja u skrućenom zavaru,
- Otpuštanje kalupa sa zavaru prije nego je završeno skrućivanje,
- Odvijanje prometa po zavaru koji je još vruć.

Zavar je potrebno ostaviti da se ohladi na temperaturu ispod 350 °C da bi se postigla dovoljna čvrstoća zavora prije nego na njega počnu djelovati bilo kakva opterećenja. Vlačna ispitivanja u toplom stanju su pokazala da se oko 80 % čvrstoće razvije pri temperaturi od 350 °C. Mjeranja su pokazala da je potrebno oko 24 minute da se zavar ohladi na temperaturu ispod 350 °C [19].

5.3.4 Opekline od pijeska

Pojavljaju se na površini tračnice gdje je oblaganjem pijesak došao u kontakt s plamenom za predgrijavanje ili lijevanim čelikom, prema slici 36. Prilikom toga dolazi do zagrijavanja pijeska na temperaturu kod koje dolazi do postakljiivanja obloženog materijala i nastaju tragovi opekline na površini tračnice. Ovakve greške se najčešće uklanjaju prilikom postupka brušenja. U nekim slučajevima su mogući popravci zavarivanjem [19].



Slika 36 Opekline od pijeska na površini glave tračnice [19]

5.3.5 Nedovoljno staljivanje

Događa se kada taljevina ne uspije doći do jedne strane ili jednog dijela tračnice kao što je prikazano slikom 37. Ovakvu vrstu oštećenja je vrlo teško otkriti nerazornim metodama ispitivanja. Greška nedovoljnog staljivanja uzrokovana je jednim ili kombinacijom slijedećih čimbenika [19]:

- Pomicanje kalupa,
- Lijevanje u hladnom stanju ili prekasno lijevanje,
- Neodgovarajuće predgrijavanje spoja,
- Loše poravnavanje plamenika uzrokuje neujednačeno predgrijavanje oba kraja tračnica,
- Neodgovarajući tlak plina za predgrijavanje,
- Pogrešan razmak između dijelova prije zavarivanja,
- Pogrešna veličina dijela za veličinu tračnice,
- Pogrešna veličina kalupa koja se koristi za zavarivanje.



Slika 37 Nedovoljno staljivanje u nožici tračnice [19]

5.3.6 Pomicanje kalupa

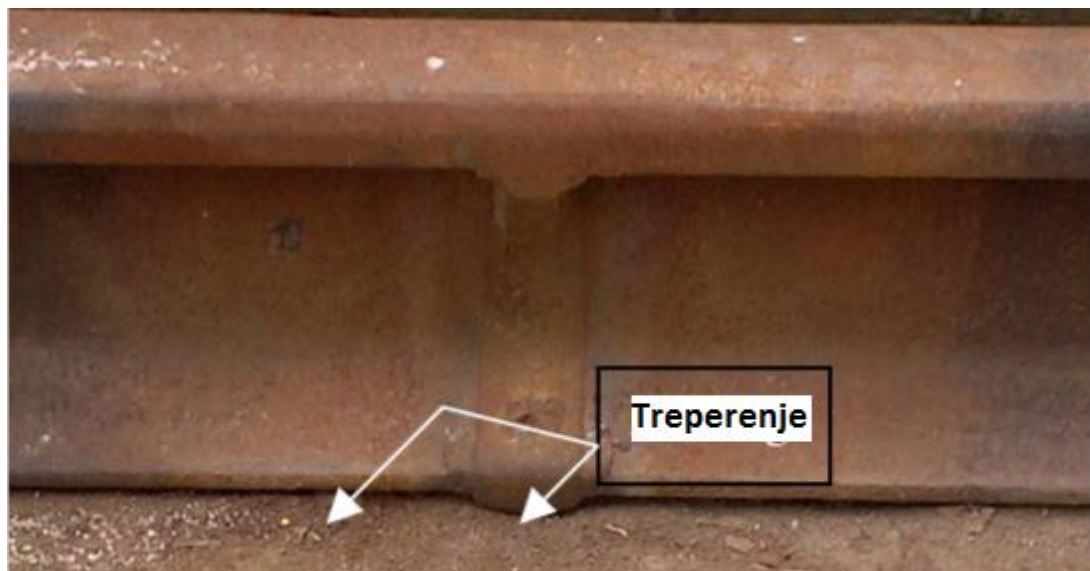
Može uzrokovati da se zavar ne spoji na jednom ili više područja tračnice, a na slici 38 je prikazano područje gdje nožica tračnice nije spojena zavarom. Do pomicanja kalupa dolazi zbog lošeg postavljanja, loše odabranog mjesta za postavljanje ili nedovoljno pričvršćenog kalupa na mjestu spoja. Od velike je važnosti da je kalup poravnat okomito i centriran prema središnjoj liniji zavora [19].



Slika 38 Nedovoljno taljenje u nožici tračnice uzrokovano pomicanjem kalupa [19]

5.3.7 Treperenje zavora

Treperenje zavora je mjesto u aluminotermijskom zavaru gdje rastaljeni metal teče između kalupa i tračnica i formira tragove prikazane slikom 39. Iako se često ne smatra ozbiljnom pogreškom u zavaru, novija iskustva su pokazala da upravo ova vrsta oštećenja uzrokuje kvarove na tračnicama za teške terete s velikim osovinskim opterećenjima [19].



Slika 39 Treperenje zavora na krajevima nožice tračnice [19]

5.3.8 Pore

Pore su uglavnom smještene unutar zavora i često nisu vidljive na vanjskoj površini zavora. Ako je prisutan veliki broj pora u zavaru, čvrstoća zavora se značajno smanjuje. Slikom 40 je prikazana greška poroznost [19].



Slika 40 Porozitet u zavaru [19]

Poroznost je kod aluminitermijskih zavara uzrokovana sa slijedećim faktorima [19]:

- Nekorištenje predgrijavanja ili neadekvatno predgrijavanje lonca koji se koristi više puta,
- Vlažan obloženi materijal,
- Nedovoljno predgrijavanje spoja,
- Pogrešna veličina dijela za odgovarajuću veličinu tračnice,
- Vlažni ili onečišćeni kalupi,
- Zavarivanje po kiši.

6 Eksperimentalni dio

6.1 Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za eksperimentalni dio rada izrezan je jedan uzorak iz „vrata“ aluminotermijski zavarene tračnice Vignol koja se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje. Cilj eksperimenta je ispitati tvrdoću zavora u „vratu“ tračnice u zoni utjecaja topline, osnovnom materijalu i metalu zavora, te donijeti zaključke o kvaliteti izvedenog aluminotermijskog zavora.

6.2 Priprema makroizbruska

Slikom 41 je prikazana tračnica iz kojeg je uzet uzorak za ispitivanje tvrdoće. Iz vrata zavarene tračnice je plinskim rezanjem izvađen uzorak većih dimenzija radi lakšeg rukovanja komadom, prikazano slikom 42. Rezanje se izvelo s mješavinom kisik – acetilen.

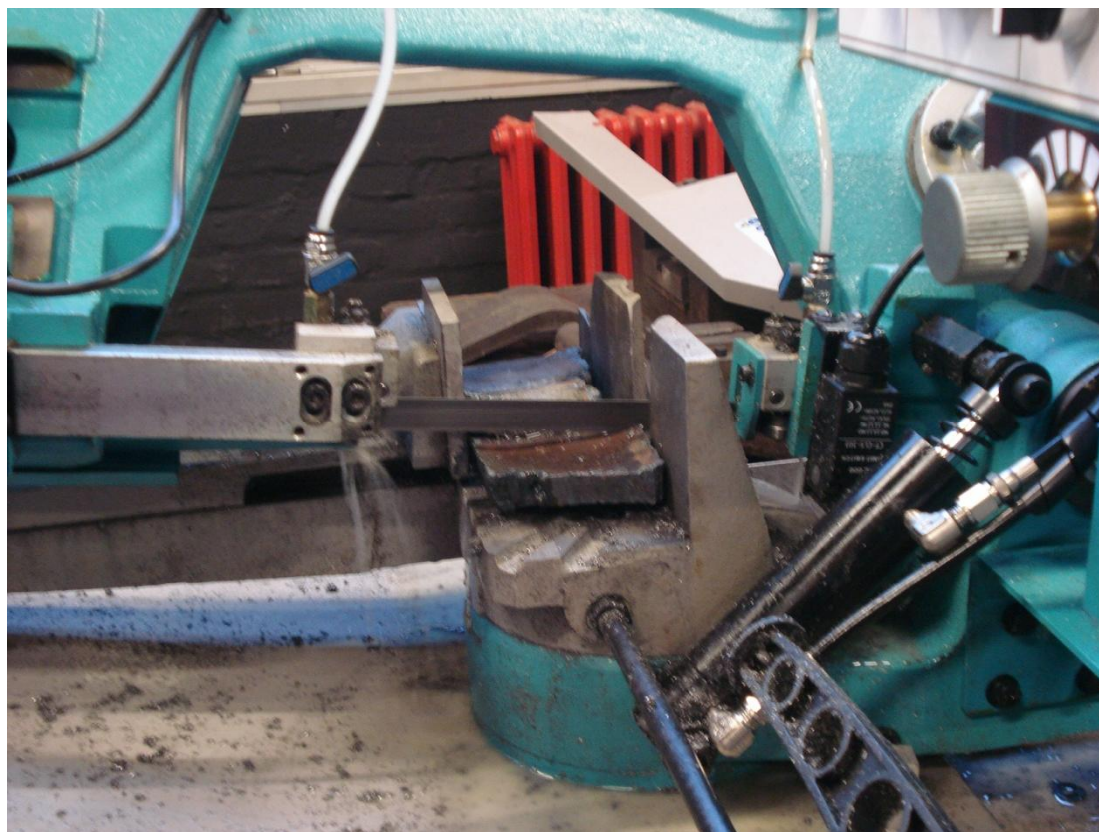


Slika 41 Tračnica prije rezanja



Slika 42 Plinsko rezanje tračnice

Nakon što je plinskim rezanjem dobiven uzorak manjih dimenzija, slijedilo je rezanje uzorka na tračnoj pili na dimenzije 80 x 20 mm. Slika 43 prikazuje proces rezanja uzorka.



Slika 43 Rezanje uzorka tračnom pilom

Dobiveni uzorak je zatim išao na brušenje (Slika 44), ručno poliranje (Slika 45) i strojno poliranje da bi se dobio metalni sjaj.

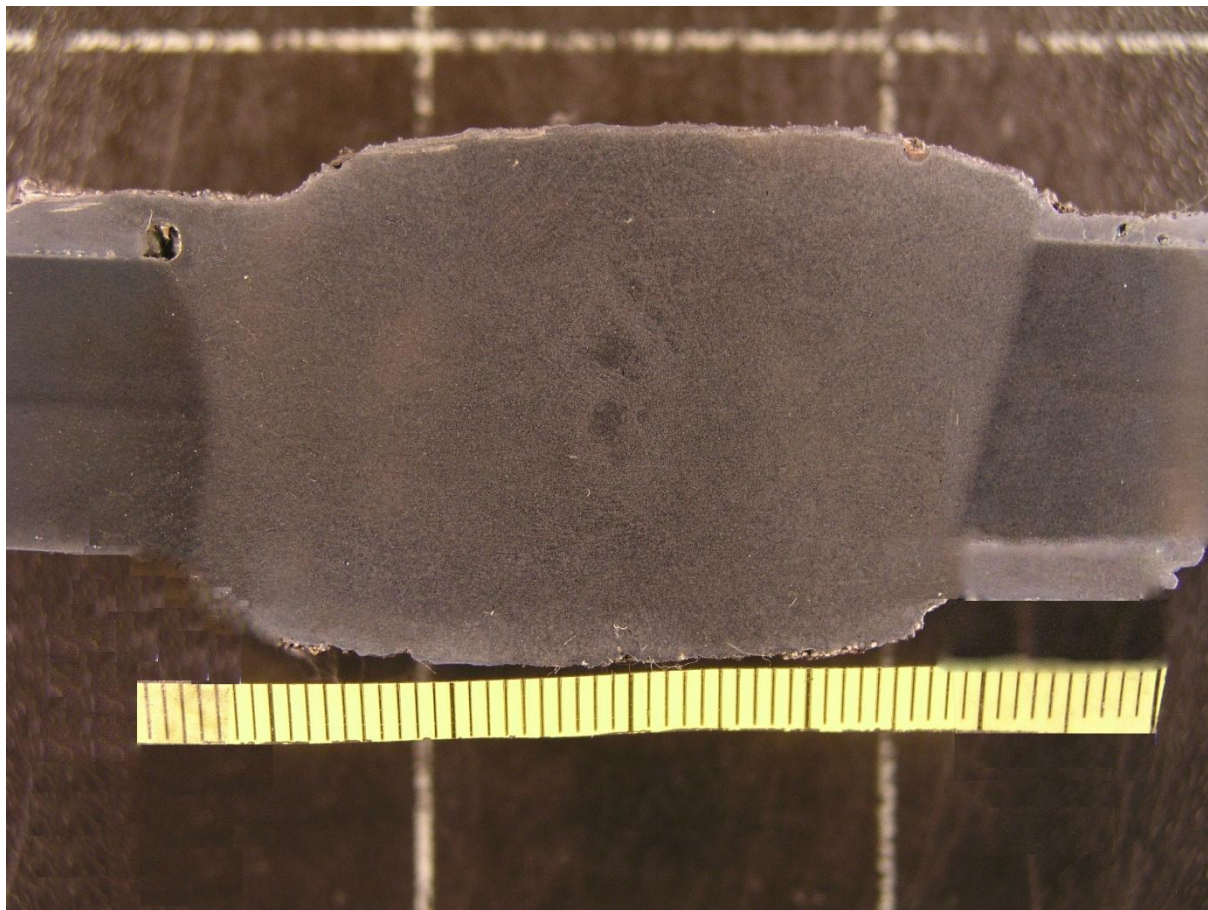


Slika 44 Brušenje uzorka brusilicom



Slika 45 Ručno poliranje uzorka brusnim papirom

Nakon poliranja slijedilo je nagrizanje uzorka u otopini nitalu kako bi mogli vidjeti osnovni, dodatni materijal i zonu utjecaja topline na uzorku. Makroizbrusak zavora prikazan je slikom 46.

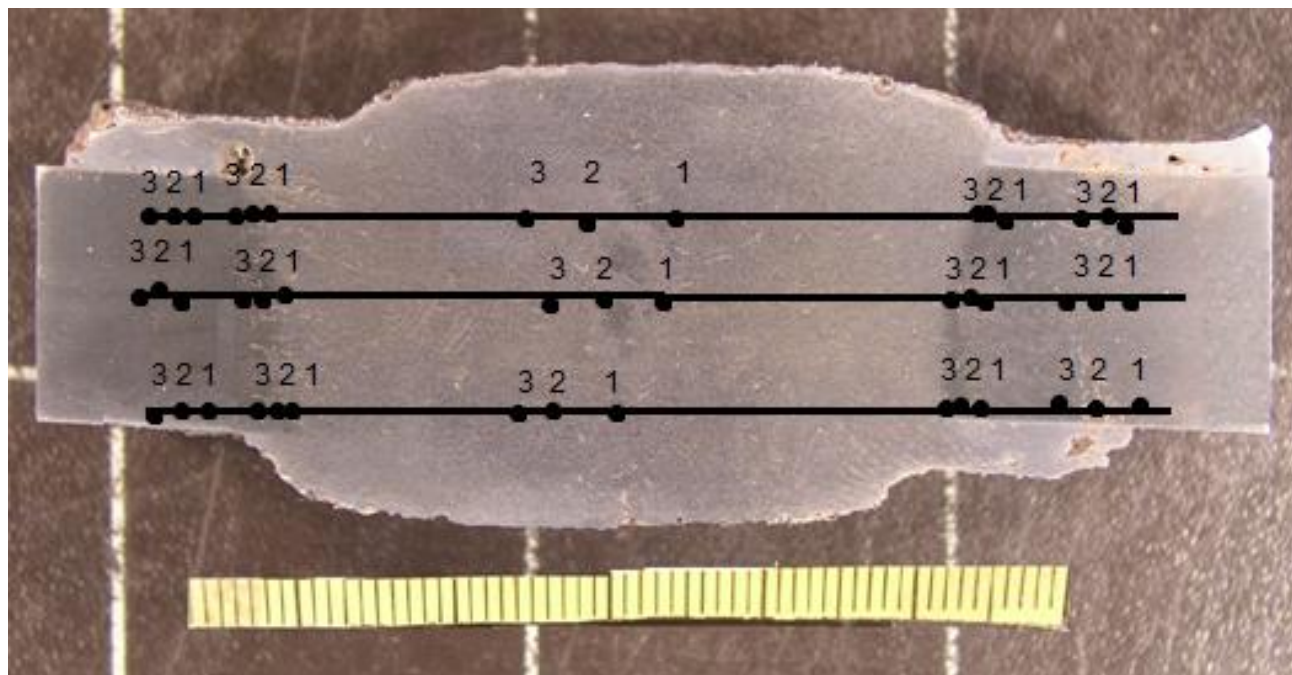


Slika 46 Makroizbrusak zavora

6.3 Mjerenje tvrdoće makroizbrusaka

Mjerenje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom. Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje, metodom HV10. Vickers metoda za mjerenje tvrdoće provodi se tako da se u materijal utiskuje pravilna četverostrana dijamantna piramida, s kutom od 136° između nasuprotnih stranica. Utiskivanje traje 10 sekundi, a sila koje se koristi za utiskivanje dijamantne piramide za metodu HV10 iznosi 98,04 N. Uređaj koji se koristio je tvrdomjer REICHTER proizveden u Njemačkoj 1977. godine. Mjerenje je provedeno u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i u metalu zavora. U svakoj od prije navedenih zona provedena su 3 mjerenja u 3 linije, što iznosi 45 mjerenja po uzorku. Svaka lokacija mjerenja

označena je točkom i rednim brojem mjerenja. Na slici 47 prikazan je makroizbrusak vrata tračnice sa označenim lokacijama na kojima su provedena mjerenja.



Slika 47 Makroizbrusak glave tračnice s lokacijama mjerenja

U tablicama 4, 5 i 6 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoća na makroizbrusku vrata tračnice. Dane oznake označuju zone na zavarenom spoju:

- MZ – metal zavora,
- ZUT – D – zona utjecaja topline desno,
- OM – D – osnovni materijal desno,
- OM – L – osnovni materijal lijevo,
- ZUT – L – zona utjecaja topline lijevo.

Tablica 4 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u prvoj liniji

Makroizbrusak vrata tračnice				
Mjerenje provedeno u prvoj liniji	Zona mjerenja	HV10	MAX. HV10	Prosječna vrijednost HV10
	OM-D1	312	327	315
	OM-D2	327		
	OM-D3	306		
	ZUT-D1	306	327	318
	ZUT-D2	322		
	ZUT-D3	327		
	MZ1	209	209	203
	MZ2	201		
	MZ3	199		
	ZUT-L1	245	299	278
	ZUT-L2	299		
	ZUT-L3	289		
	OM-L1	322	333	326
	OM-L2	322		
	OM-L3	333		

Tablica 5 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u drugoj liniji

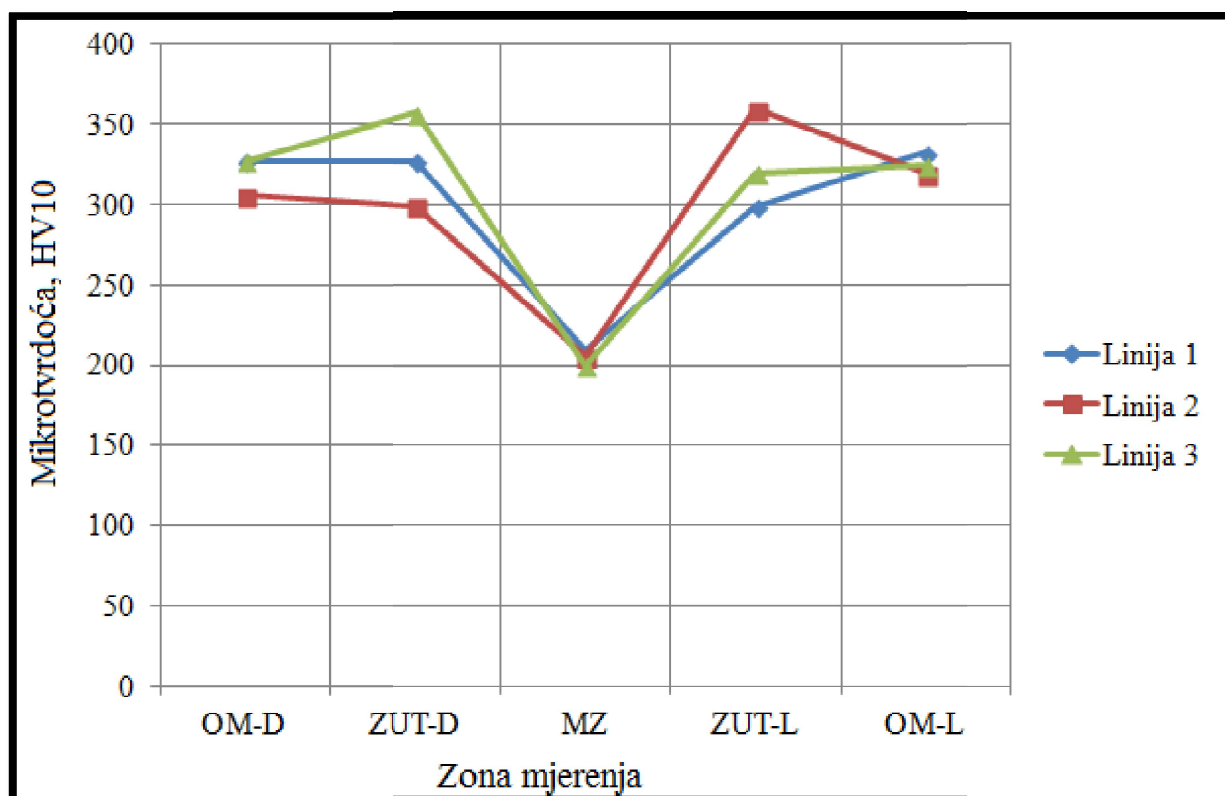
Makroizbrusak vrata tračnice				
Mjerenje provedeno u drugoj liniji	Zona mjerenja	HV10	MAX. HV10	Prosječna vrijednost HV10
	OM-D1	294	306	299
	OM-D2	306		
	OM-D3	297		
	ZUT-D1	297	299	282
	ZUT-D2	299		
	ZUT-D3	249		
	MZ1	196	205	197
	MZ2	205		
	MZ3	189		
	ZUT-L1	314	360	328
	ZUT-L2	360		
	ZUT-L3	309		
	OM-L1	319	319	316
	OM-L2	314		
	OM-L3	314		

Tablica 6 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV10 u trećoj liniji

Makroizbrusak vrata tračnice				
Mjerenje provedeno u trećoj liniji	Zona mjerenja	HV10	MAX. HV10	Prosječna vrijednost HV10
	OM-D1	317	327	318
	OM-D2	327		
	OM-D3	309		
	ZUT-D1	314	357	323
	ZUT-D2	357		
	ZUT-D3	299		
	MZ1	199	199	194
	MZ2	185		
	MZ3	197		
	ZUT-L1	247	319	293
	ZUT-L2	319		
	ZUT-L3	312		
	OM-L1	309	325	316
	OM-L2	325		
	OM-L3	314		

Iz izmjerenih vrijednosti može se zaključiti da se najveća tvrdoća zavara nalazi u zoni utjecaja topline. Tvrdoća u ZUT-u iznosi do 360 HV. Metal zavara mjerenjem se pokazao „najmekši“. Prosječna vrijednost tvrdoće metala zavara iznosi 200 HV, dok je prosječna tvrdoća osnovnog materijala oko 300 HV. Prema normi HRN EN ISO 15614 – 1 maksimalna dopuštena tvrdoća čelika za tračnice iznosi 380 HV, rezultati mjerenja ne prelaze tu granicu, čime je zadovoljen uvjet sigurnosti zavarenog spoja.

Na slici 48 prikazani su profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća.



Slika 48 Dijagram maksimalnih izmjerenih tvrdoća makroizbrusaka

7 Zaključak

Željeznice predstavljaju jedan od najjeftiniji, najbržih, najpouzdanijih i najsigurnijih način prijevoza masivne robe i ljudi. Da bi se to osiguralo, potrebno je izgraditi kvalitetna prijevozna sredstva i pruge. Budući da tračnice čine dio željezničkog prometa one također moraju biti kvalitetno napravljene i spojene. Zavarivanje i spajanje tračnica vrlo je važna radnja zbog sigurnog odvijanja željezničkog prometa. Današnji zahtjevi na tračnice i zavarivanje tračnica uvelike su se promijenili u odnosu na početke primjene tračnica. Današnji zahtjevi se uglavnom odnose na mogućnost odvijanja željezničkog prometa velikim brzinama i velikog intenziteta prometa. Osim uz te zahtjeve, glavni zahtjev je primanje velikih opterećenja za prijevoz roba velike mase i velikog broja ljudi. Sigurnost današnjih modernih željeznica je na prvom mjestu.

Aluminotermijski postupak zavarivanja predstavlja pouzdan način spajanja tračnica u dugi trak. Uz dobro provedenu proceduru zavarivanja i obučeno osoblje, aluminotermijski postupak zavarivanja donosi niz prednosti kod zavarivanja tračnica. Glavna prednost aluminotermijskog procesa zavarivanja je to što se gotovo bilo koje dvije tračnice mogu uspješno spojiti. Inženjeri imaju neprocjenjivo oružje na raspolaganju kada su u pitanju aluminotermijski zavari, jer ono omogućuje spajanje svih oblika, veličina i tvrdoća željezničkih tračnica. Aluminotermijski zavar će stoga ostati važan dio konstrukcije željeznice i prakse popravaka i u ovom stoljeću. Cijena i jednostavnost aluminotermijskog zavarivanja će osigurati mjesto aluminotermijskom zavaru i u budućnosti. Međutim, daljnji razvoj i unapređenje aluminotermijskog zavarivanja se može provesti kroz kontinuirano podučavanje zavarivača i osoblja, pridržavanje preporuka proizvođača opreme i materijala, istraživanja grešaka koje se pojavljuju, poboljšanje kvalitete materijala za zavarivanje, usredotočiti se više na inovacije koje će unaprijediti aluminotermijsko zavarivanje.

Na temelju ispitivanja tvrdoće se može zaključiti da je problematična zona utjecaja topline kod koje dolazi do porasta tvrdoće, ali i metal zavara gdje imamo dosta nisku tvrdoću u odnosu na osnovni materijal. U zoni utjecaja topline dolazi do otvrdnjavanja zavara što je nepovoljno za dinamički opterećene tračnice u eksploataciji. Nedovoljna žilavost zavara i prevelika tvrdoća mogu uzrokovati pucanje tračnica zbog dinamičkog opterećenja. Prema normi HRN EN ISO 15614 – 1 maksimalna dopuštena tvrdoća za čelike tračnica iznosi 380 HV. Maksimalna izmjerena tvrdoća uzorka iznosi 360 HV, što je manje od maksimalne dopuštene tvrdoće prema navedenoj normi, čime je zadovoljen uvjet sigurnosti spoja.

Literatura

- [1] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [2]: <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf>.
- [3] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2008.
- [4] Goldschmidt-Thermit-Group: http://www.thermit-welding.com/thermit_welding_process.php.
- [5] Popović O., Prokić-Cvetković R., Jovičić R.: Razvoj čelika za izradu šina, IMK-14, 41, 2011, 25-32.
- [6] Kostelić H.: Željeznice, Skripta za studente građevinskog fakulteta u Rijeci.
- [7] Lakušić S.: Željeznice, Predavanja za studente III. godine Građevinskog fakulteta, Zagreb.
- [8] Eurostone-Hermeler GmbH: www.eurostone-gmbh.de/de/produkte-leistungen-schienen-zubehoer-de.html.
- [9] Marušić D.: Gornji ustroj željeznica, Predavanja za studente 1. godine diplomskog studija, Mostar, 2009.
- [10] Voestalpine: Welding recommendation for Vignol and Grooved rails, 2012.
- [11] Raić K.: Rekonstrukcija željezničke pruge na dionici Čelebići-Čapljina (državna granica), e-zbornik, br. 8, 2014, str. 44-58.
- [12] Lakušić S., Ahac M., Haladin I.: Elektrolučni postupci zavarivanja tramvajskih tračnica, 2012..
- [13] Sandor T, Ramsey J, Dumovic M, Wiseman R; Onsite Repair Welding Of Rails, 2011..
- [14] O'Brien R. L.: WELDING Handbook, Eight edition, Volume 2, AWS, Miami, 1997.
- [15] Goldschmidt-Thermit-Group: <http://www.goldschmidt-thermit.com>.
- [16] Arhiva slika Katedre za zavarene konstrukcije, FSB, Zagreb.
- [17] India thermit Corporation LTD: <http://www.indiathermit.com/repairwelding.htm#>.
- [18] Amiable impex: <http://www.exothermic-welding.com/Exothermic-Weld-Catalogue-Amiable-Impex.pdf>.
- [19] Welding Technology Institute of Australia:
http://industrialultrasonic.com.br/wa_files/www_industrialultrasonic_com_br_site_img_ultrassom_metro_ferrovuario_TGN-R-04_20Aluminothermic_20wel.pdf, 2006.